

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ante Severinski

DIPLOMSKI RAD

Sisak, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ante Severinski

**UTJECAJ DEBLJINE STIJENKE ODLJEVKA NA MORFOLOGIJU
GRAFITRA U FERITNOM SILICIJEM OČVRSNUTOM
NODULARNOM LIJEVU**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

izv.prof.dr.sc. Stjepan Kožuh - predsjednik
prof.dr.sc. Zoran Glavaš - član
doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović- član
doc.dr.sc. Ivan Jandrlić– zamjenski član

Sisak, srpanj 2018.

ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru prof.dr.sc. Zoranu Glavašu koji mi je omogućio svu potrebnu opremu i pomogao svojim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje brojne upite.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i prijateljicama, posebno Filipu, Tomislavu, Janu i Petri, koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijeli ovaj tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno.

Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji koja me je uvijek podržavala i upućivala na pravi put.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili tu, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

Veliko HVALA svima!

SAŽETAK

UTJECAJ DEBLJINE STIJENKE ODLJEVKA NA MORFOLOGIJU GRAFITA U FERITNOM SILICIJEM OČVRSNUTOM NODULARNOM LIJEVU

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj debljine stijenke odljevka na morfologiju grafita u feritnom silicijem očvrnutom nodularnom lijevu. Ukupno su izrađene tri taline sa sljedećim udjelima silicija: 3,11, 3,8 i 4,22 %. Analiza je provedena na odljegovcima stepenastog oblika koji sadrže sedam stijenki različite debljine: 3, 12, 25, 38, 50, 75 i 100 mm. Dobiveni rezultati pokazuju da se broj nodula/mm² i nodularnost smanjuju s povećanjem debljine stijenke. Povećanje udjela silicija od 3,11 do 4,22 % rezultiralo je povećanjem broja nodula/mm² i nodularnosti u stijenkama debljine 3, 12, 25 i 38 mm. Međutim, u debelim stijenkama, tj. stijenkama debljine 50, 75 i 100 mm povećanje udjela silicija rezultiralo je smanjenjem broja nodula/mm² i nodularnosti. U tim stijenkama, s porastom udjela silicija povećavao se broj jako sitnih nepravilnih grafitnih čestica i nakupina čestica grafita koje po obliku sličje *chunky* grafitu.

Ključne riječi: feritni silicijem očvrnuti nodularni lijev, mikrostruktura

ABSTRACT

EFFECT OF CASTING WALL THICKNESS ON GRAPHITE MORFOLOGY IN FERRITIC DUCTILE IRON STRENGTHENED BY SILICON

Effect of the casting wall thickness on the graphite morphology in ferritic ductile iron strengthened by silicon was analysed in this graduate thesis. Three melts with the following silicon contents were made: 3.11, 3.8 and 4.22 %. The analysis was carried out on stepped castings containing seven different wall thicknesses: 3, 12, 25, 38, 50, 75, and 100 mm. Obtained results show that the nodule count and nodularity decrease with increasing wall thickness. The increase in silicon content from 3.11 to 4.22 % resulted in an increase in nodule count and nodularity in wall thicknesses of 3, 12, 25 and 38 mm. However, in thick walls, i.e. in wall thicknesses of 50, 75 and 100 mm, the increase in silicon content resulted in a decrease in nodule count and nodularity. In these walls, the number of very small irregular graphite particles and clusters of graphite particles that look like chunky graphite increased with the increase in silicon content.

Key words: ferritic ductile iron strengthened by silicon, microstructure

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1. Vrste i svojstva nodularnih ljevova | 2 |
| 2.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva nodularnog lijeva | 5 |
| 2.3. Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu nodularnog lijeva | 10 |
| 2.4. Proizvodnja nodularnog lijeva | 13 |
| 2.4.1. Nodularizatori | 14 |
| 2.4.2. Postupci nodulacije (obrade magnezijem) | 14 |
| 2.4.3. Cijepljenje nodularnog lijeva | 16 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO | 18 |
| 3.1. Izrada talina nodularnog lijeva | 18 |
| 3.2. Lijevanje stepenastih odljevaka | 19 |
| 3.3. Uzimanje uzoraka za metalografsku analizu iz stepenastih odljevaka | 21 |
| 3.4. Metalografska analiza | 22 |
| 4. REZULTATI I DISKUSIJA | 24 |
| 4.1. Kemijski sastav stepenastih odljevaka | 24 |
| 4.2. Mikrostrukturne značajke stepenastih odljevaka | 25 |
| 4.3. Utjecaj debljine stijenke na broj nodula/mm ² i nodularnost | 32 |
| 4.4. Utjecaj udjela silicija na broj nodula/mm ² i nodularnost | 33 |
| 4.5. Utjecaj debljine stijenke i udjela silicija na udio ferita u metalnoj osnovi | 36 |
| 5. ZAKLJUČAK | 38 |
| 6. LITERATURA | 39 |
| ŽIVOTOPIS | 41 |

1. UVOD

Nodularni lijev pripada skupini željeznih ljevova u kojima je ugljik izlučen u obliku grafita. U nodularnom lijevu grafit ima nodularni, odnosno kuglasti oblik [1]. Kuglasti oblik grafita nodularnom lijevu daje visoku granicu razvlačenja i visoku istezljivost te dobru žilavost, livljivost i strojnu obradivost. Vlačna čvrstoća nodularnog lijeva obično se nalazi u intervalu od 350 do 1600 N/mm², što prvenstveno ovisi o njegovoj mikrostrukturi [1, 2]. Nodularni lijev svoju primjenu je našao u proizvodnji raznih konstrukcijskih odljevaka (~ 1/3 svjetske proizvodnje), zatim za proizvodnju cijevi, ventila i elemenata cjevovoda (~ 1/3 svjetske proizvodnje) te za izradu odljevaka u industriji motornih vozila (~ 1/3 svjetske proizvodnje) [3].

Svojstva nodularnog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukturi [1]. Različite mikrostrukture rezultiraju različitim svojstvima. Iz tog razloga postoji više kvaliteta nodularnog lijeva.

Nodularne ljeveve možemo svrstati u dvije skupine. Prvoj skupini pripadaju feritni, feritno-perlitni i perlitni nodularnih ljevovi, dok drugoj skupini pripadaju feritni silicijem očvršnuti nodularni ljevovi. Rezultati provedenih istraživanja pokazuju da se legiranjem feritnog nodularnog lijeva sa silicijem u količinama iznad 3,0 mas. % postupno povećava vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, a da pri tome ne dolazi do značajnijeg smanjenja žilavosti i istezljivosti, što predstavlja razliku u odnosu na uobičajene kvalitete feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih ljevova [3, 4]. Budući da imaju potpuno feritnu metalnu osnovu, strojna obrada feritnih silicijem očvršnutih nodularnih ljevova odvija se lakše od strojne obrade uobičajenih feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih ljevova. Zbog svoje povoljne kombinacije mehaničkih svojstava i strojne obradivosti, feritni silicijem očvršnuti nodularni ljevovi mogu zamijeniti feritno-perlitne nodularne ljeveve, ali i pojedine kvalitete perlitnih nodularnih ljevova [4].

Na mikrostrukturu nodularnog lijeva utječe kemijski sastav i brzina hlađenja. Elementi poput bakra, kositra i antimona promoviraju stvaranje perlita, dok silicij pospješuje stvaranje ferita. Brzina hlađenja ima važnu ulogu za vrijeme, ali i nakon skrućivanja. Promjene u brzini hlađenja tijekom skrućivanja utječu na oblik i broj grafitnih čestica, te pojavu karbida u mikrostrukturi [1, 3, 5]. Brzina hlađenja značajno utječe i na strukturu metalne osnove.

U okviru ovoga rada proučavan je utjecaj debljine stijenke odljevka na morfologiju grafitnih čestica u feritnim silicijem očvršnutim nodularnim ljevovima koji sadrže 3,1, 3,8 i 4,3 mas. % Si.

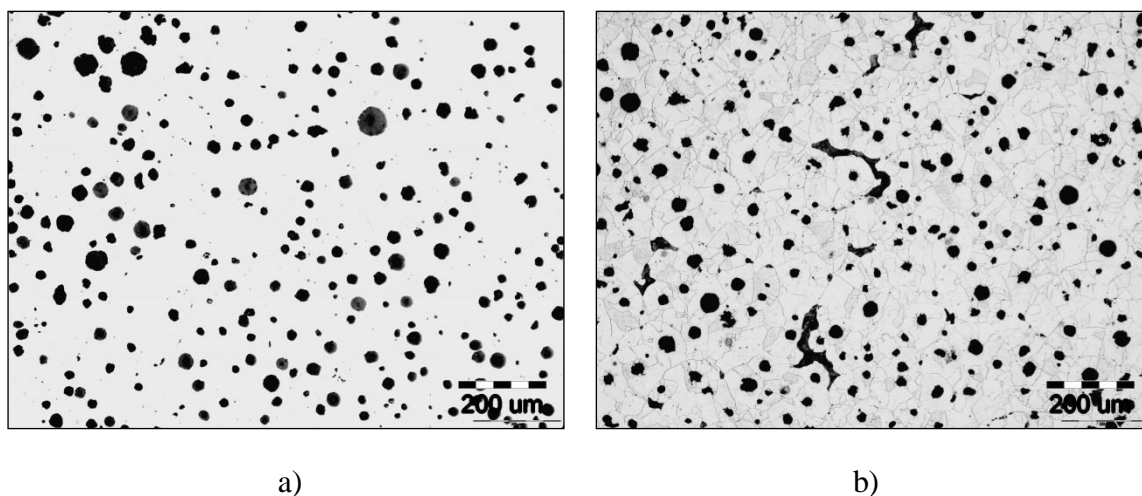
2. TEORIJSKI DIO

2.1. Vrste i svojstva nodularnih ljevova

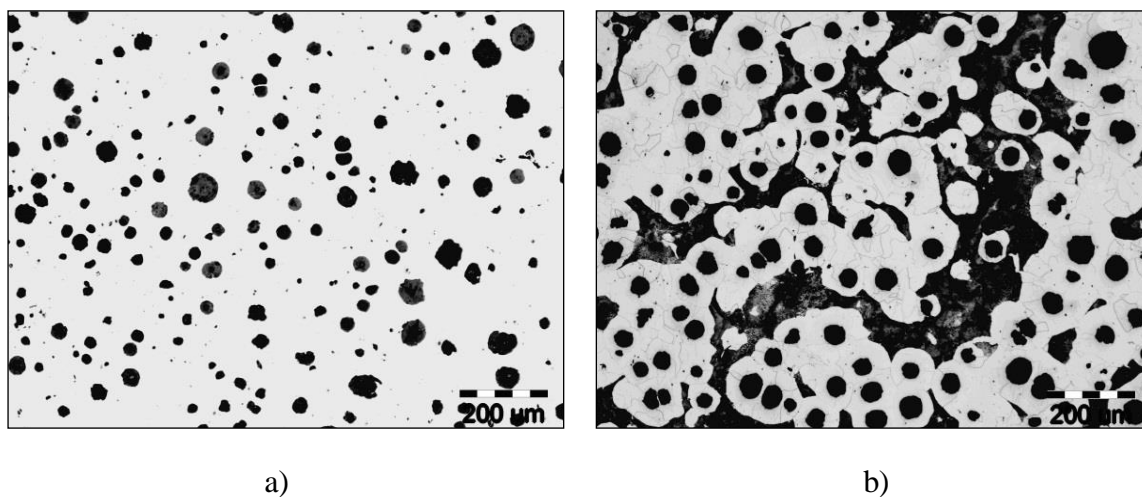
Prema normi EN 1563:2011 nodularne ljevove dijelimo u dvije grupe [6]:

- feritni, feritno-perlitni i perlitni nodularni ljevovi,
- feritni nodularni ljevovi očvrtnuti silicijem.

Na slikama 2.1 i 2.2 prikazane su metalografske snimke mikrostrukture feritnog i feritno-perlitnog nodularnog ljeva.



Slika 2.1. Metalografske snimke mikrostrukture feritnog nodularnog ljeva:
a) nenagrizeni stanje, b) nagrizeni stanje, nital [7]



Slika 2.2. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog ljeva:
a) nenagrizeni stanje, b) nagrizeni stanje, nital [8]

Tablica 2.1 prikazuje mehanička svojstva feritnih, feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih ljevova prema normi EN 1563:2011.

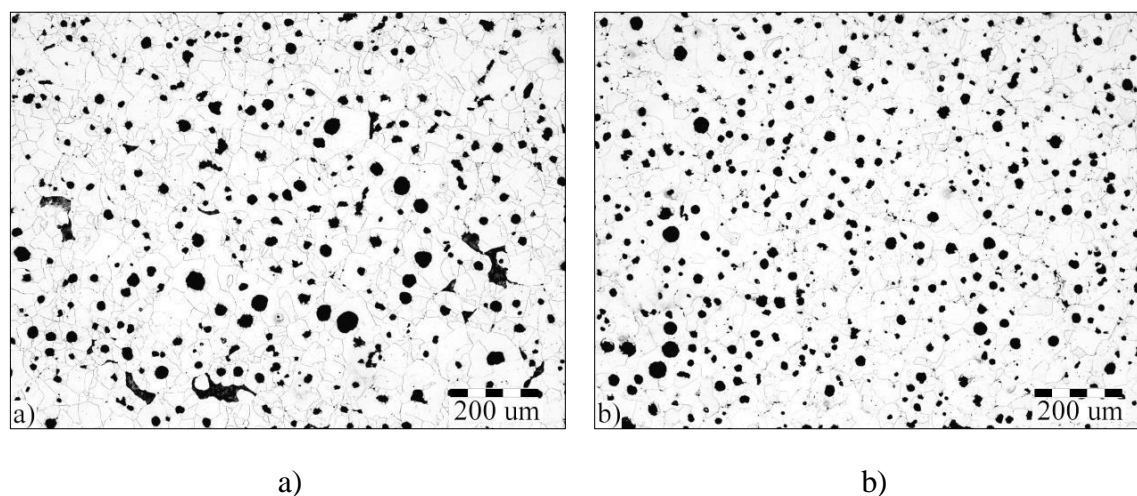
Tablica 2.1. Minimalne vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i istežljivosti za kvalitete feritnih, feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih ljevova propisane normom EN 1563:2011 (mjerena se provode na standardiziranim ispitnim uzorcima koji se izrađuju strojnom obradom iz lijevanih uzoraka) [6]

| Označivanje materijala | | Debljina relevantne stijenke, t , mm | Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, N/mm ² , min. | Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ² , min. | Istežljivost A , %, min. |
|--------------------------------|--------|--|---|--|----------------------------|
| Oznaka | Broj | | | | |
| EN-GJS-350-22-LT ^{a)} | 5.3100 | $t \leq 30$ | 220 | 350 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 210 | 330 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 200 | 320 | 15 |
| EN-GJS-350-22-RT ^{b)} | 5.3101 | $t \leq 30$ | 220 | 350 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 220 | 330 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 210 | 320 | 15 |
| EN-GJS-350-22 | 5.3102 | $t \leq 30$ | 220 | 350 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 220 | 330 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 210 | 320 | 15 |
| EN-GJS-400-18-LT ^{a)} | 5.3103 | $t \leq 30$ | 240 | 400 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 230 | 380 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 220 | 360 | 12 |
| EN-GJS-400-18-RT ^{b)} | 5.3104 | $t \leq 30$ | 250 | 400 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 250 | 390 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 240 | 370 | 12 |
| EN-GJS-400-18 | 5.3105 | $t \leq 30$ | 250 | 400 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 250 | 390 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 240 | 370 | 12 |
| EN-GJS-400-15 | 5.3106 | $t \leq 30$ | 250 | 400 | 15 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 250 | 390 | 14 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 240 | 370 | 11 |
| EN-GJS-450-10 | 5.3107 | $t \leq 30$ | 310 | 450 | 10 |
| | | $30 < t \leq 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| | | $60 < t \leq 200$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| EN-GJS-500-7 | 5.3200 | $t \leq 30$ | 320 | 500 | 7 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 300 | 450 | 7 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 290 | 420 | 5 |
| EN-GJS-600-3 | 5.3201 | $t \leq 30$ | 370 | 600 | 3 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 360 | 600 | 2 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 340 | 550 | 1 |
| EN-GJS-700-2 | 5.3300 | $t \leq 30$ | 420 | 700 | 2 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 400 | 700 | 2 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 380 | 650 | 1 |
| EN-GJS-800-2 | 5.3301 | $t \leq 30$ | 480 | 800 | 2 |
| | | $30 < t \leq 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| | | $60 < t \leq 200$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| EN-GJS-900-2 | 5.3302 | $t \leq 30$ | 600 | 900 | 2 |
| | | $30 < t \leq 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| | | $60 < t \leq 200$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |

^{a)} LT - (engl. *low temperature*) – udarna žilavost određuje se pri niskim temperaturama

^{b)} RT - (engl. *room temperature*) – udarna žilavost određuje se pri sobnoj temperaturi

Na slici 2.3 prikazane su metalografske snimke mikrostrukture feritnog silicijem očvršnutog nodularnog lijeva.



Slika 2.3. Metalografske snimke mikrostrukture silicijem očvršnutog nodularnog lijeva u nagriženom stanju (nital): a) 3,11 mas. %Si, b) 4,22 mas.% Si [9]

Tablica 2.2 prikazuje mehanička svojstva feritnih nodularnih ljevova očvršnutih silicijem prema normi EN 1563:2011.

Tablica 2.2. Minimalne vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i istežljivosti za kvalitete feritnih nodularnih ljevova očvršnutih silicijem propisane normom EN 1563:2011 (mjerjenja se provode na standardiziranim ispitnim uzorcima koji se izrađuju strojnom obradom iz lijevanih uzoraka) [6]

| Označivanje materijala | | Debljina relevantne stijenke, t , mm | Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, N/mm ² , min. | Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ² , min. | Istežljivost A , %, min. |
|------------------------|--------|--|---|--|----------------------------|
| Oznaka | Broj | | | | |
| EN-GJS-450-18 | 5.3108 | $t \leq 30$ | 350 | 450 | 18 |
| | | $30 \leq t \leq 60$ | 340 | 430 | 14 |
| | | $t > 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| EN-GJS-500-14 | 5.3109 | $t \leq 30$ | 400 | 500 | 14 |
| | | $30 \leq t \leq 60$ | 390 | 480 | 12 |
| | | $t > 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |
| EN-GJS-600-10 | 5.3110 | $t \leq 30$ | 470 | 600 | 10 |
| | | $30 \leq t \leq 60$ | 450 | 580 | 8 |
| | | $t > 60$ | Dogovor između proizvođača i kupca | | |

Usporedbom podataka u tablicama 2.1 i 2.2 može se vidjeti da kod iste vrijednosti vlačne čvrstoće, feritni silicijem očvršnuti nodularni ljevovi imaju višu granicu razvlačenja i istežanje od uobičajenih feritnih, feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih ljevova. Omjer $R_{p0.2}/R_m$ feritnih silicijem očvršnutih nodularnih ljevova kreće se oko 0,8, dok kod uobičajenih feritnih, feritno-perlitnih ili perlitnih nodularnih ljevova taj omjer iznosi oko 0,65.

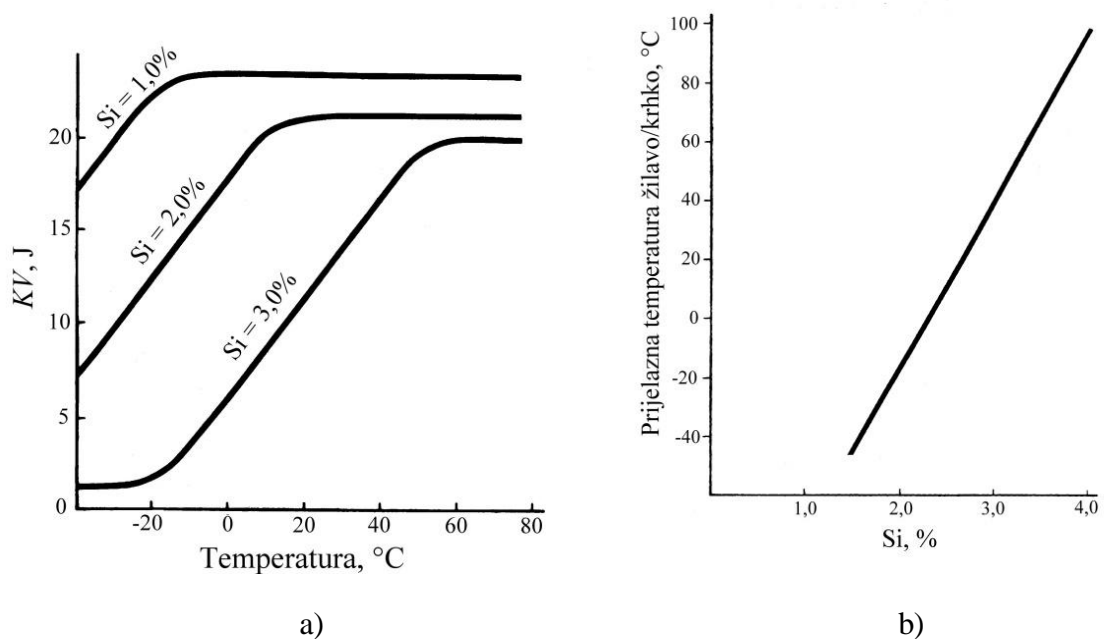
2.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva nodularnog lijeva

Mikrostruktura nodularnog lijeva značajno ovisi o njegovom kemijskom sastavu, dok su svojstva nodularnog lijeva rezultat njegove mikrostrukture.

Ugljik je stalno prisutan element u nodularnom lijevu i kao takav važan je za izlučivanje grafita. O udjelu ugljika ovisi i to da li će nodularni lijev biti podeutektičnog, eutektičnog ili nadeutektičnog sastava, pa prema tome, ugljik značajno utječe na slijed skrućivanja [1, 3, 5]. Previsok udio ugljika može dovesti do nastanka nepravilnih oblika i flotacije grafitnih čestica, što negativno djeluje na vlačna svojstva nodularnog lijeva [1, 3]. Povećanje udjela ugljika može dovesti do povećanja broja nodula/mm² ukoliko talina ima visok nukleacijski potencijal [3].

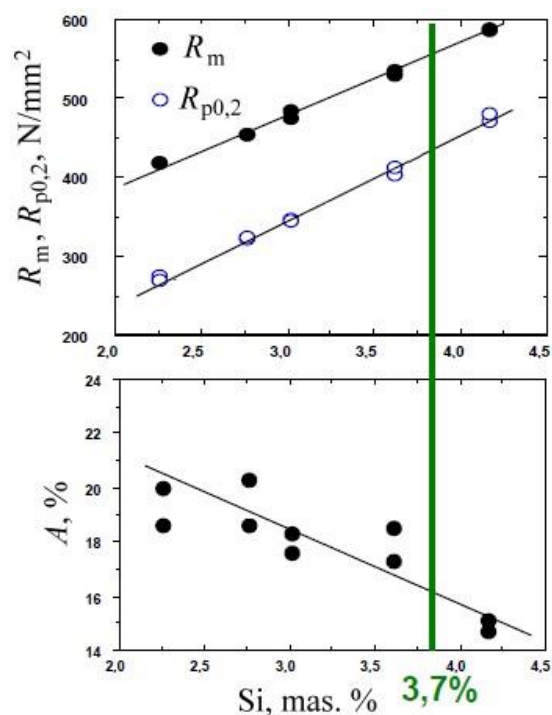
Silicij je grafitotvorac, odnosno pospješuje izlučivanje ugljika u obliku grafita i otežava stvaranje karbida tijekom skrućivanja [1, 3, 10, 11]. Utječe i na metalnu osnovu na način da promovira stvaranje ferita [1, 3, 9, 12].

Na slici 2.4 uočava se da povećanjem udjela silicija opada istezljivost i žilavost nodularnog lijeva, a raste prijelazna temperatura žilavo/krhko [1, 3, 13].



Slika 2.4. a) utjecaj udjela silicija i temperature na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva, b) promjena prijelazne temperature žilavo/krhko ovisno o udjelu silicija u nodularnom lijevu [3]

Granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i tvrdoća feritnih nodularnih ljevova legiranih silicijem rastu s povećanjem udjela silicija, dok žilavost i istezljivost opadaju (slika 2.5, tablica 2.3) [4, 14]. To se događa iz razloga što silicij očvršćuje ferit [4, 9]. Radi se o mehanizmu očvršćivanja krute otopine supstitucijskim atomima [15 – 22].



Slika 2.5. Utjecaj silicija na vlačna svojstva feritnog nodularnog lijeva [14]

Tablica 2.3. Utjecaj silicija na vlačna svojstva, tvrdoću i udarni rad loma nodularnog lijeva (debljina stijenke 25 mm) [9]

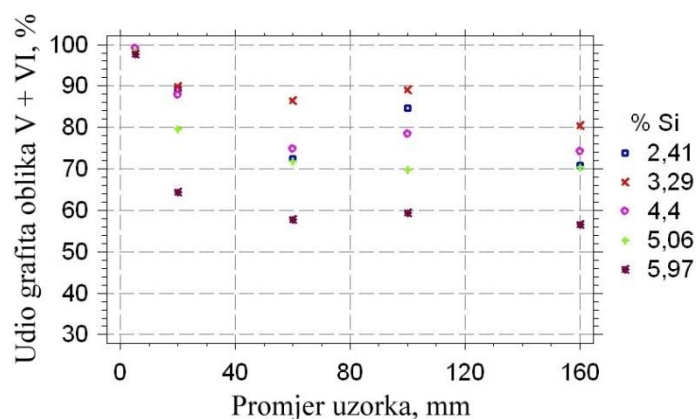
| Si, mas. % | $R_{p0,2}$ / N/mm ² | R_m / N/mm ² | $R_{p0,2}/R_m$ | A, % | Tvrdoća HV20 | KV, J |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|---------|-----------------|----------|
| 3,11 | 356 | 487 | 0,73 | 18,5 | 206 | 106 |
| 3,55 | 410 | 509 | 0,81 | 17,4 | 212 | 81 |
| 3,80 | 468 | 551 | 0,85 | 17,0 | 226 | 63 |
| 4,22 | 553 | 637 | 0,87 | 10,5 | 251 | 45 |
| 4,71 | 538 | 592 | 0,91 | 3,3 | 282 | 19 |
| 5,42 | 531 | 531 | 1 | - | 322 | 10 |

Tablica 2.4 pokazuje utjecaj silicija na morfologiju i broj grafitnih čestica u nodularnom lijevu. Može se vidjeti da povećanje udjela silicija rezultira povećanjem nodularnosti i broj nodula.

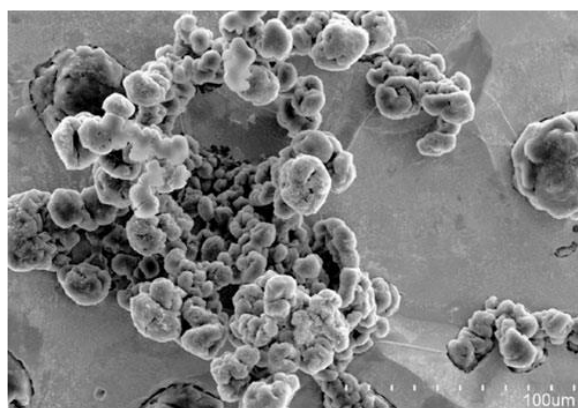
Tablica 2.4. Utjecaj silicija na mikrostrukturne značajke nodularnog lijeva (debljina stijenke 25 mm) [9]

| Si, mas. % | Nodularnost, % | Broj nodula/mm ² | Udio ferita u metalnoj osnovi, % | Udio perlita u metalnoj osnovi, % |
|---------------|-------------------|-----------------------------|--|---|
| 3,11 | 83,1 | 177 | 98,1 | 1,9 |
| 3,55 | 84,6 | 198 | 98,6 | 1,4 |
| 3,80 | 87,1 | 249 | 100 | 0 |
| 4,22 | 87,6 | 305 | 100 | 0 |
| 4,71 | 87,4 | 301 | 100 | 0 |
| 5,42 | 86,1 | 304 | 100 | 0 |

Istraživanja [23] su pokazala značajan utjecaj silicija na morfologiju grafita i nodularnost u debelim stijenama (slika 2.6). Može se vidjeti smanjenje broja nodula s porastom udjela silicija. Pored toga javljaju se grafitni oblici slični „chunky“ grafitu (slika 2.7) koji mogu negativno utjecati na mehanička svojstva.



Slika 2.6. Utjecaj silicija na udio grafitnih oblika V + VI u različitim debljinama stijenke odljevaka od nodularnog lijeva [23]



Slika 2.7. Nakupina grafitnih čestica u debelostijenom odljevku od nodularnog lijeva s visokim udjelom silicija [23]

Preporučeni udjeli silicija u feritnim silicijem očvrnutim nodularnim ljevovima prema normi EN 1563:2011 prikazani su u tablici 2.5.

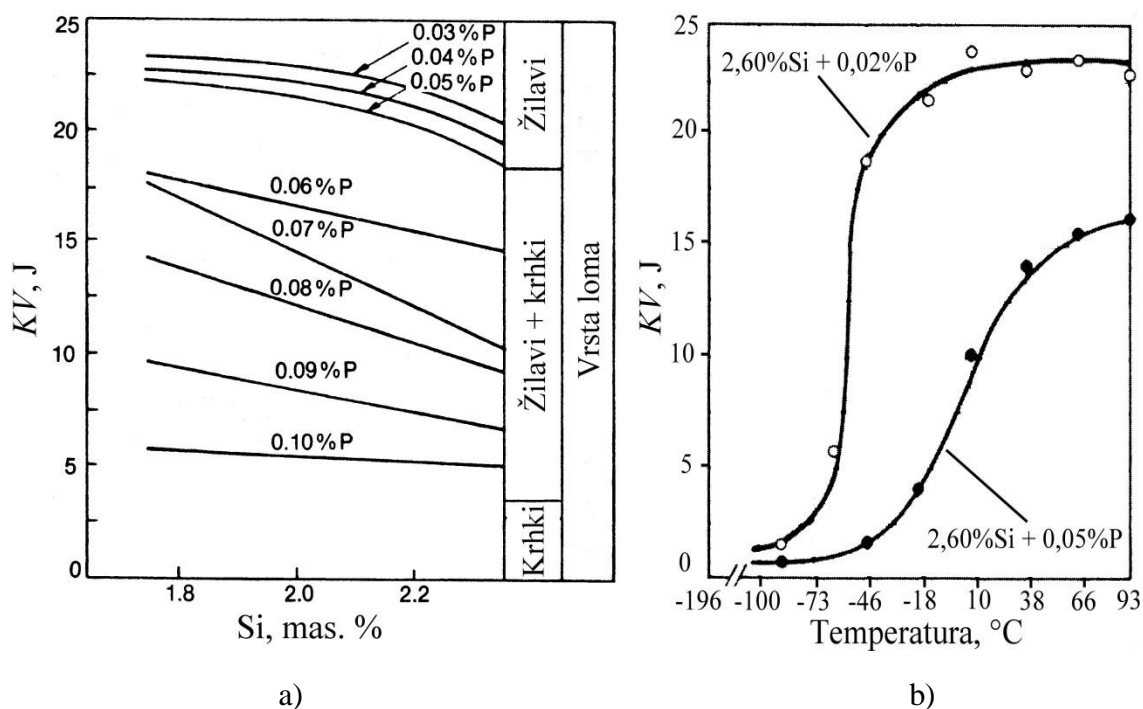
Tablica 2.5. Preporučeni udjeli silicija, fosfora i mangana u feritnim silicijem očvrnutim nodularnim ljevovima prema normi EN 1563:2011 [6]

| Označivanje materijala | | Si, mas. % | P, mas. %, maks. | Mn, mas. % maks. |
|------------------------|--------|---------------|---------------------|---------------------|
| Oznaka | Broj | | | |
| EN-GJS-450-18 | 5.3108 | 3,2 | 0,05 | 0,5 |
| EN-GJS-500-14 | 5.3109 | 3,8 | 0,05 | 0,5 |
| EN-GJS-600-10 | 5.3110 | 4,3 | 0,05 | 0,5 |

Mangan pospješuje stvaranje karbida i perlita [1, 3, 5, 10]. Zbog toga njegov udio treba biti što niži [1]. Preporučeni udjeli mangana u feritnim silicijem očvrslutim nodularnim ljevovima prema normi EN 1563:2011 prikazani su u tablici 2.5. S nižim udjelima mangana (npr. 0,3 mas. %) poboljšava se istezanje i strojna obradivost feritnog nodularnog lijeva očvrslutog silicijem [6].

Sumpor ima ulogu u procesu nukleacije nodularnog grafitu jer je sastavni dio određenih uključaka na kojim se izlučuje grafit [1]. Međutim, previsoki udjeli nisu poželjni jer reagira s magnezijem koji je ključan za stvaranje nodularnog oblika grafitnih čestica. Udio sumpora u nodularnom lijevu trebao bi se nalaziti u granicama od 0,008 do 0,015 mas.% [1, 3].

Fosfor je ~ 10 puta efikasniji u stvaranju perlita od mangana [24]. Međutim, pri većim udjelima fosfora nastaje spoj Fe_3P poznat pod nazivom steadit, koji se tijekom skrućivanja izlučuje po granicama zrna kao tvrda i krhka faza. Zbog toga fosfor negativno utječe na vlačna svojstva, posebno na istezljivost, te žilavost i prijelaznu temperaturu žilavo/krhko (slika 2.8). Iz navedenih razloga udio fosfora u nodularnom lijevu trebao bi biti što niži. Preporučeni udjeli fosfora u feritnim silicijem očvrslutim nodularnim ljevovima prema normi EN 1563:2011 prikazani su u tablici 2.5.



Slika 2.8. a) utjecaj udjela fosfora i silicija na udarni rad loma nodularnog lijeva, b) promjena prijelazne temperature žilavo/krhko ovisno o udjelu fosfora i silicija [3]

Silicij i fosfor imaju najznačajniji utjecaj na udio ugljika u eutektiku, pa se udio sva tri elementa može promatrati kroz ugljični ekvivalent CE: [1]:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (2.1)$$

Ako je $CE = 4,3$ nodularni lijev imat će eutektični sastav. Ako je $CE < 4,3$ sastav nodularnog lijeva bit će podeutektičan, dok će u slučaju da je $CE > 4,3$ sastav nodularnog lijeva biti nadeutektičan. Ako je sastav nodularnog lijeva podeutektičan, prva faza koja će se izlučivati tijekom skrućivanja je primarni austenit. Kod nadeutektičnog sastava prva faza koja će se izlučivati tijekom skrućivanja je primarni grafit nodularnog oblika. Previsoki nadeutektični sastavi nisu poželjni jer nastaju velike primarne nodule koje mogu negativno utjecati na mehanička svojstva.

Magnezij je ključan element u procesu proizvodnje nodularnog lijeva [1, 3]. Dodaje se u talinu da bi se tijekom skrućivanja dobio nodularni oblik grafitnih čestica. Optimalni udio magnezija u nodularnom lijevu kreće se od 0,035 do 0,045 mas. % [1, 3].

Nikal je grafitotvorac [1]. Dodatkom nikla u feritni nodularni lijev povećava se granica razvlačenja i vlačna čvrstoća bez negativnog utjecaja na žilavost. Zbog toga se nikal upotrebljava kao djelomična zamjena za silicij u nodularnim ljevovima koji moraju imati visoku vlačnu čvrstoću i žilavost [1, 3, 10].

Krom je snažan karbidotvorac [1, 3]. Karbidi kroma imaju veliku stabilnost zbog čega se teško mogu razložiti žarenjem na visokim temperaturama. Iz tog razloga udio kroma u nodularnom lijevu trebao bi biti što niži.

Vanadij je također snažan karbidotvorac [1, 3]. Zbog toga udio vanadija u nodularnom lijevu treba biti što niži.

Molibden stvara karbide i pospješuje stvaranje perlita [1, 3, 24]. Međutim, molibden je slabiji karbidotvorac od kroma i vanadija. U kombinaciji s niklom i kromom poboljšava mehanička svojstva nodularnog lijeva na visokim temperaturama [10].

Bakar pospješuje izlučivanje ugljika u obliku grafita i stvaranje perlita [1, 3, 25 - 27]. Udio bakra od 0,82 mas. % je dovoljan da bi se ostvarila potpuno perlitna metalna osnova [1, 3].

Kositar već pri vrlo niskim udjelima pospješuje stvaranje perlita [1, 3, 10, 24, 26]. Dodatak kositra od 0,03 do 0,08 mas. % je dovoljan da bi se dobila potpuno perlitna metalna osnova [1, 3].

Neki elementi već pri minimalnim udjelima otežavaju stvaranje grafitnih nodula [1, 3, 24, 28]. Nazivaju se **antinodularizatori**, a to su: **antimon, arsen, bizmut, olovo, kositar, aluminij, titan, kadmij i cirkonij**. Utjecaj antinodularizatora na oblik grafitnih čestica može se odrediti na osnovi faktora antinodularnosti (Thielmanova faktora) [24, 28]:

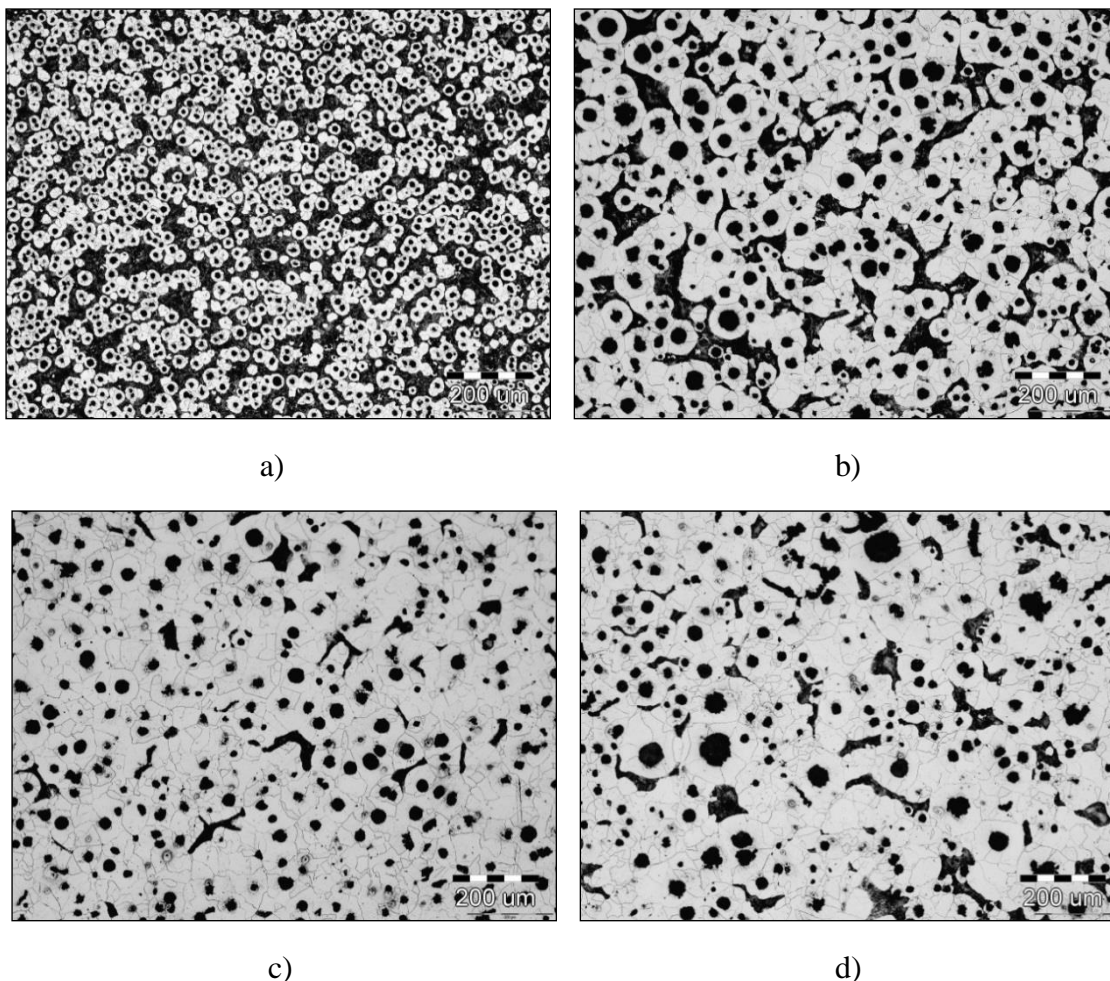
$$K_1 = 4,4 (\% \text{ Ti}) + 2,0 (\% \text{ As}) + 2,4 (\% \text{ Sn}) + 5,0 (\% \text{ Sb}) + 290 (\% \text{ Pb}) + 370 (\% \text{ Bi}) + 1,6 (\% \text{ Al}) \quad (2.2)$$

K_1 faktor treba biti manji od 1 [24, 28]. Ako se vrijednost K_1 faktora kreće do 2, dodatkom elemenata rijetkih zemalja može se neutralizirati negativni učinak antinodularizatora. Korisno je dodati elemente rijetkih zemalja u talinu kada je $K_1 < 1,2$, a ako je $K_1 > 1,2$ onda se elementi rijetkih zemalja moraju obavezno dodati [24, 28].

Elementi rijetkih zemalja (RE), kao što su **cerij, lantan, praseodimij i neodimij** također djeluju kao nodulatori, poput magnezija [1, 3, 10]. Ako se dodaju u odgovarajućoj količini zajedno s magnezijem mogu povećati broj nodula. Ti elementi dodani u pravilnoj količini mogu neutralizirati štetno djelovanje antinodularizatora [10, 24, 28, 29]. Visoki udjeli elemenata rijetkih zemalja mogu dovesti do problema jer u tankim stijenkama može doći do stvaranja karbida, dok u debelim stijenkama dolazi do stvaranja vrlo nepoželjnog „chunky“ grafita [3, 10].

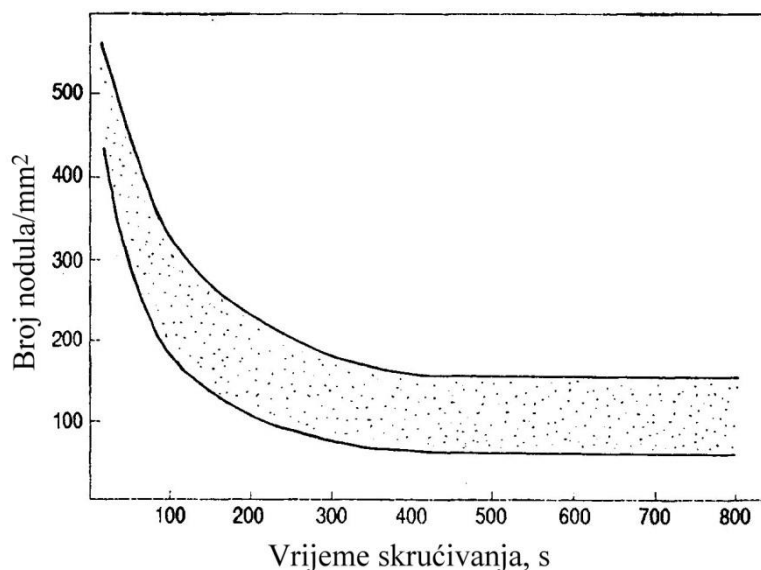
2.3. Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu nodularnog lijeva

Brzina hlađenja utječe na morfologiju grafita i strukturu metalne osnove [1, 3, 30, 31]. S povećanjem brzine hlađenja, odnosno smanjenjem debljine stijenke odljevka povećava se broj nodula i smanjuje njihova veličina (slike 2.9 i 2.10). Razlog za to je porast pothlađenja taline tijekom skrućivanja s povećanjem brzine hlađenja. Brzina nukleacije i broj mjesta za nukleaciju grafita povećaju se s povećanjem pothlađenja, što rezultira povećanjem broja nodula.



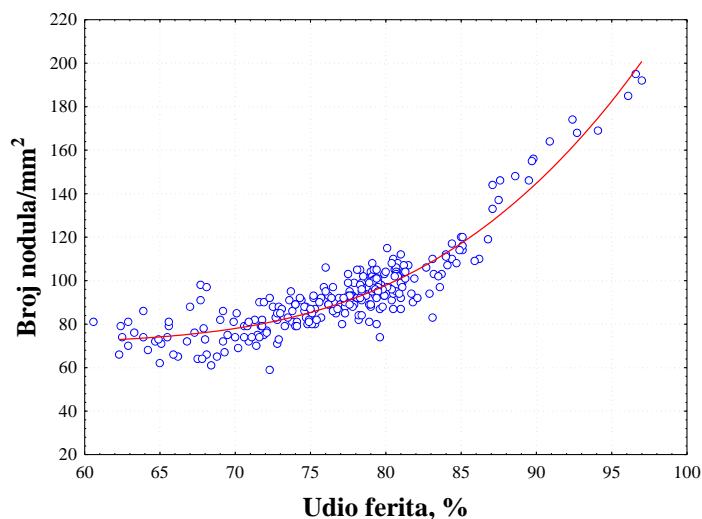
Slika 2.9. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka od nodularnog lijeva koji sadrži 3,7 %C, 2,77 %Si, 0,141 %Mn, 0,017 %P, 0,007 %S, 0,102 %Cu i 0,024 %Mg.

Nagrizenano stanje, nital: a) stijenka debljine 6,3 mm, b) stijenka debljine 12,7 mm, c) stijenka debljine 25,4 mm, d) stijenka debljine 38,1 mm [31]



Slika 2.10. Utjecaj vremena skrućivanja na broj nodula u nodularnom lijevu [30]

Broj nodula utječe na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi te nodularnost. Što je veći broj nodula veći je udio ferita i veća je nodularnost (slike 2.11 i 2.12) [1].

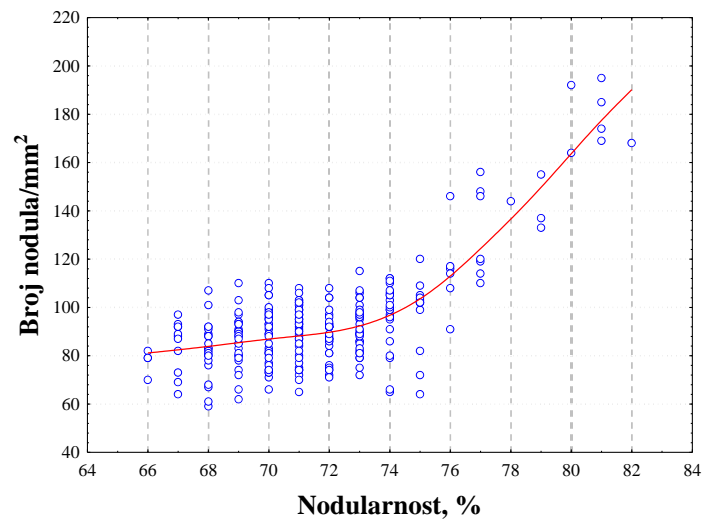


Slika 2.11. Utjecaj broja nodula na udio ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [1]

Tijekom hlađenja odljevka od nodularnog lijeva nakon skrućivanja smanjuje se topljivost ugljika u austenitu [1]. Zbog toga ugljik iz austenita difundira na grafitne nodule. Što je veći broj grafitnih nodula to su kraći putovi koje atomi ugljika iz austenita moraju prijeći do grafitnih nodula. To znači da manje ugljika ostaje u austenitu, što olakšava stvaranje ferita tijekom eutektoidne pretvorbe. U suprotnom, ako austenit sadrži povišen udio ugljika, tijekom eutektoidne pretvorbe nastat će perlit.

Kada se razmatra utjecaj broja nodula na metalnu osnovu treba uzeti u obzir i brzinu hlađenja [1]. Tanke stijenke hlade se velikim brzinama, zbog čega se smanjuje vrijeme raspoloživo za difuziju ugljika iz austenita na nodule. U konačnici to dovodi do povišenog udjela perlita u metalnoj osnovi iako je broj nodula visok (slika 2.9a). Debele stijenke sporije se hlade, zbog čega ugljik ima više vremena na raspolaganju za difuziju iz austenita na grafitne nodule. Iz toga razloga debele stijenke sadrže veći udio ferita u

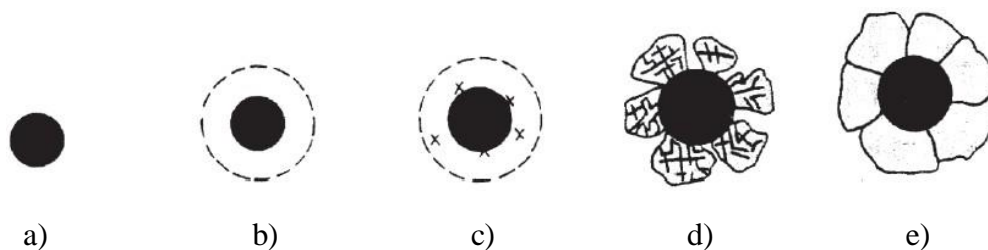
metalnoj osnovi iako broj nodula nije visok (slika 2.9d). Ako se promatraju dva odljevka jednake debljine koji se hlade jednakim brzinama, odljevak koji ima veći broj nodula u mikrostrukturi imat će i veći udio ferita u metalnoj osnovi.



Slika 2.12. Utjecaj broja nodula na nodularnost u nodularnom lijevu [1]

Nodularnost predstavlja udio grafitnih nodula u ukupnom broju grafitnih čestica u mikrostrukturi nodularnog lijeva [1]. Prema tome, što je veći broj nodula manji je broj grafitnih čestica koje nemaju nodularan oblik. To u konačnici daje veću nodularnost.

Brzina hlađenja utječe na brzinu formiranja austenitne ovojnice oko grafitnih nodula, a time i na njihov oblik [32 - 34]. Austenit ima veću brzinu rasta od nodularnog grafita, zbog čega se oko nodula formira austenitna ovojnica. Austenitna ovojnica oko grafitnih nodula sastoji se od više zrna austenita koja su u međusobnom kontaktu. Proces nastajanja austenitne ovojnice shematski je prikazan na slici 2.13.









Slika 2.13. Shematski prikaz nastajanja austenitne ovojnice oko nodula:

- a) izlučivanje nodule, b) oko nodule nastaje područje s niskim udjelom ugljika,
- c) nukleacija austenita u području oko nodule, d) dendriti austenita međusobno se povezuju, e) austenitna ovojnica formirana oko nodule [33]

Razlikujemo tri tipa austenitne ovojnice: brzo zatvorena, sporo zatvorena i otvorena (tablica 2.6.).

Tablica 2.6. Utjecaj tipa austenitne ovojnice na oblik grafita [33]

| Austenitna ovojnica | Proces oblikovanja grafita | Oblik grafita |
|---------------------|--|---|
| Brzo zatvorena |  |  |
| Sporo zatvorena |  |  |
| Otvorena |  |  |

Brzo zatvorena austenitna ovojnica formira se tijekom brzog hlađenja. Brzo obavljanje nodula austenitom omogućuje da nodule zadrže svoj sferični oblik. Daljnji rast nodula odvija se difuzijom ugljika iz taline kroz austenitnu ovojnicu do nodula.

Sa smanjenjem brzine hlađenja tijekom skrućivanja smanjuje se brzina formiranja austenitne ovojnice oko grafitnih nodula. U tom slučaju grafitna nodula je duže vrijeme u kontaktu s preostalim talinom. Atomi ugljika neravnomjerno difundiraju iz preostale taline na nodulu, što dovodi do njene degeneracije (tj. odstupanja od nodularnog oblika). Što je duže vrijeme kontakta grafitne nodule s preostalim talinom veća je i mogućnost njene degeneracije. Prema tome, sporo zatvoreni i otvoreni tip austenitne ovojnice rezultiraju stvaranjem nepravilnih grafitnih čestica, tj. čestica koje nemaju sferičan (nodularan) oblik.

Segregacije elemenata (npr. mangana, kroma, titana, elemenata rijetkih zemalja itd.) u talini između austenitnih zrna povećavaju se sa smanjenjem brzine hlađenja. Zbog toga se smanjuje likvidus temperatura taline u tim područjima. U tom slučaju između austenitnih zrna postoje uski kanali koji su duže vrijeme u tekućem stanju i preko kojih je grafitna nodula u kontaktu s preostalim talinom. Očito je da se na taj način odgađa formiranje (zatvaranje) austenitne ovojnice oko nodula, što u konačnici rezultira njenom degeneracijom.

2.4. Proizvodnja nodularnog lijeva

Proizvodnja nodularnog lijeva započinje proizvodnjom primarne taline [1, 3, 30]. Proizvodnja primarne taline sastoji se od taljenja uložnih materijala i pripreme primarne taline te je vrlo važan korak u proizvodnji odljevaka od nodularnog lijeva. Primarna talina najčešće se proizvodi u kupolnim i indukcijskim pećima. Kao uložni materijal koriste se sivo sirovo željezo, povratni materijal, čelični otpad, ferolegure, sredstva za naugljičenje, te u kupolnim pećima još se koristi i koks.

Kako bi se proizveo nodularni lijev potrebno je provesti obradu primarne taline na način da se u talinu dodaju nodularizatori, odnosno elementi koji će omogućiti izlučivanje grafita u obliku nodula tijekom skrućivanja [1, 3, 30].

2.4.1. Nodularizatori

Čisti magnezij je najjednostavnije sredstvo za obradu taline u procesu proizvodnje nodularnog lijeva [1, 3, 30]. Tehnološki problemi obrade taline čistim magnezijem su niska topljivost magnezija u tekućem željezu, niska temperatura vrenja, niska gustoća odnosno tendencija ka isplivavanju, visok afinitet prema kisiku na osnovi čega se stvara MgO koji u oblaku gustog bijelog dima odlazi u atmosferu te visok afinitet prema sumporu, zbog čega dolazi do stvaranja MgS.

Predlegure FeSiMg. Kako bi se povećala efikasnost obrade taline razvijene su specijalne legure na bazi magnezija, tj. „predlegure“. Predlegure se ne koriste za legiranje, nego samo za modifikaciju oblika grafita. Najčešće se primjenjuju predlegure FeSiMg s niskim sadržajem cerija i elemenata rijetkih zemalja, jer i ti elementi djeluju kao nodularizatori [1, 3, 30]. Predlegure FeSiMg omogućuju lakše dodavanje u talinu i bolje iskorištenje magnezija, te se danas najčešće upotrebljavaju za proizvodnju nodularnog lijeva. Njihovom primjenom iskorištenje magnezija iznosi 60 - 80 %. Predlegure FeSiMg koje se najviše upotrebljavaju u praksi sadrže ~ 5 % magnezija.

Predlegure FeNiMg lako se dodaju u talinu te pružaju visoko i konzistentno iskorištenje magnezija, jer imaju visoku gustoću i lagano tonu kroz talinu bez burnih reakcija [1, 3, 30]. Zbog relativno visoke cijene, ove predlegure manje se koriste u procesu proizvodnje nodularnog lijeva od predlegura FeSiMg [1].

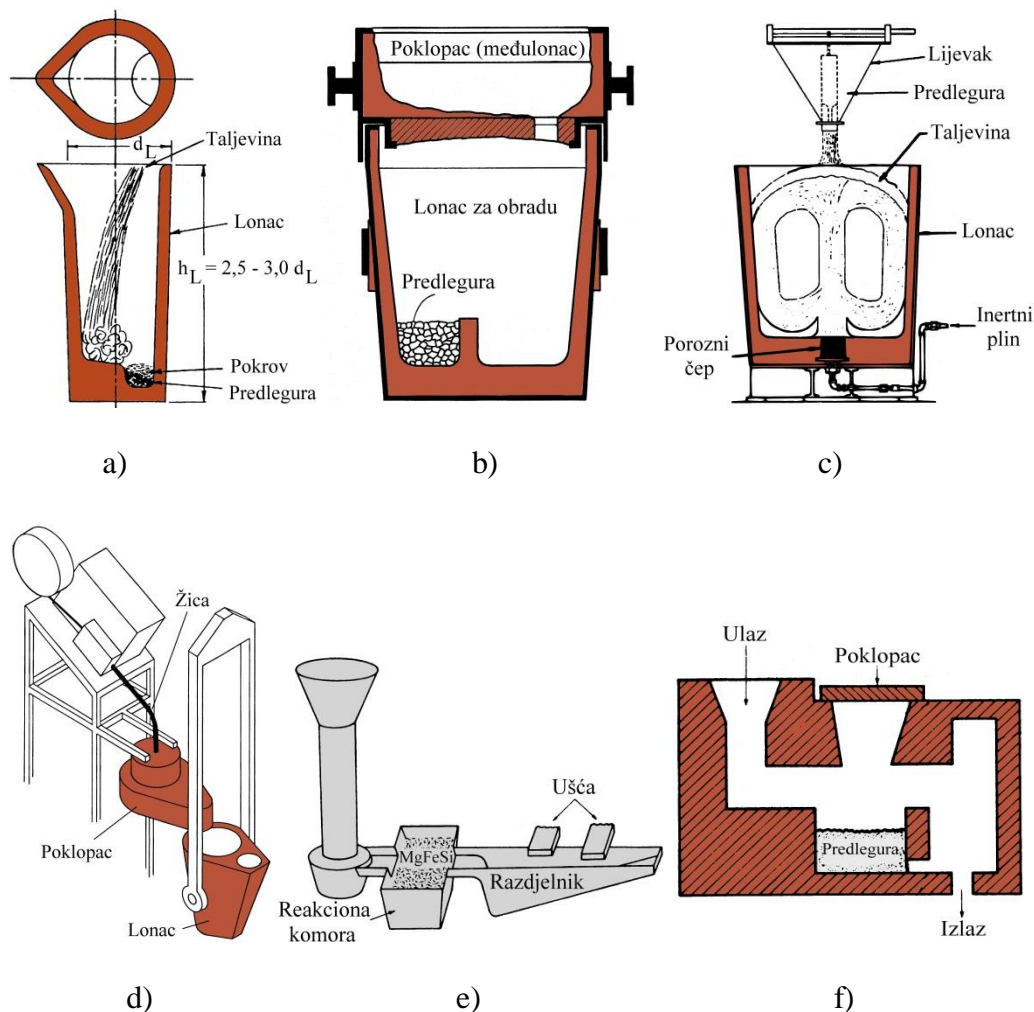
Cerij i elementi rijetkih zemalja. Cerij, kao pripadnik skupine elemenata rijetkih zemalja, također djeluje kao nodularizator, ali za razliku od magnezija nije lako ispariv [1, 3, 30]. Kad se obrada provodi s cerijem neće se javiti burne reakcije te nastajanje dima kao u slučaju obrade s magnezijem. Međutim, cerij ima visoku sklonost ka stvaranju karbida, što ograničava njegovu primjenu. Zbog toga se ne koristi kao primarni nodularizator, već kao sastavni dio predlegure FeSiMg. Takvom primjenom povećava se broj nodula.

Od ostalih elementa rijetkih zemalja koriste se lantan, itrij, neodimij i praseodimij. Zbog visoke cijene ne upotrebljavaju se samostalno, već se kao i cerij dodaju u malim udjelima u predlegure FeSiMg.

2.4.2. Postupci nodulacije (obrade magnezijem)

Najčešći postupci nodulacije su (slika 2.14) [1, 3, 30]:

- postupci obrade u loncu:
 - a) postupak obrade u otvorenom loncu - „*Sandwich*“ postupak,
 - b) postupak obrade u loncu s poklopcem - „*Tundish Cover*“ postupak,
 - c) postupak obrade u loncu uz propuhivanje s inertnim plinom - „*Osmose*“ postupak,
 - d) postupak obrade punjenom žicom - „*Cored Wire*“ postupak,
- postupak obrade u kalupu - „*In Mould*“ postupak,
- postupak protjecanja - „*Flotret*“ postupak.



Slika 2.14. Shematski prikaz postupaka nodulacije (obrade magnezijem): a) obrada u otvorenom loncu, b) obrada u pokrivenom loncu, c) obrada u loncu uz propuhivanje inertnim plinom, d) obrada punjenom žicom, e) obrada u kalupu, f) obrada protjecanjem [1]

Postupak obrade u otvorenom loncu najčešće se koristi za proizvodnju nodularnog lijeva [1, 3, 30]. Predlegura za obradu primarne taline i cjepivo stavljaju se u džep na dnu predgrijanog lonca i potom prekrivaju sitnom čeličnom strugotinom kako bi se odgodila reakcija s talinom i na taj način povećalo iskorištenje magnezija (slika 2.14a). U tako pripremljen lonac ulijeva se primarna talina iz peći i dolazi do obrade. Ovaj postupak je jednostavan i fleksibilan, a oprema je jeftina. Velika količina dima i prašine koji se razvijaju tijekom obrade i manje iskorištenje magnezija svako su najznačajniji nedostaci ovog postupka obrade.

Postupak obrade loncu s poklopcem je poboljšana verzija prethodno opisanog postupka obrade u otvorenom loncu (slika 2.14b) [1, 3, 30]. Na loncu se nalazi poklopac u koji se ulijeva primarna talina. Omjer visine i promjera lonca mora biti veći od 2:1. Primarna talina kroz otvor na dnu poklopca odlazi u lonac gdje reagira s predlegurom FeSiMg koja je smještena u džep na dnu lonca i na nju je stavljen pokrov. Zbog poklopca na loncu pare magnezija ne odlaze u atmosferu. To rezultira većim iskorištenjem magnezija, ali i boljim radnim uvjetima u lijevaonici.

Postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom karakterističan je po tome što na dnu lonca ima ugrađen porozni čep kroz koji se uvodi inertni plin za miješanje taline i predlegure za obradu (slika 2.14c) [1, 3, 30]. Dodatak predlegure provodi se putem lijevka koji je smješten iznad lonca.

Postupak obrade punjenom žicom prikazan je na slici 2.14d. Predlegura ili čisti magnezij nalaze se unutar čelične žice promjera 9 - 16 mm koja je namotana u kolut [1, 3, 30]. Dodatak žice provodi se na osnovi udjela sumpora u primarnoj talini. Brzine uvođenja žice u primarnu talinu u loncu kreću se do 120 m/min. Žica se tali blizu dna lonca. Nastale pare magnezija kreću se prema gore kroz talinu i usvajaju se u talini.

Postupak obrade u kalupu karakterističan je po tome što ima reakcijsku komoru u koju se smješta predlegura FeSiMg, a koja se nalazi u uljevnom sustavu (slika 2.14e) [1, 3, 30]. S obzirom da se obrada provodi u kalupu, udio sumpora u primarnoj talini treba biti nizak, < 0,01 mas.%. Na taj način smanjuje se mogućnost prisutnosti uključaka troske u odljevku. Primarna talina lijeva se iz lonca u uljevni sustav. Pri prolasku kroz reakcijsku komoru primarna talina otapa predleguru i dolazi do obrade. Iskorištenje magnezija je visoko (70 - 80 %). Tijekom tog postupka obrade ne dolazi do emisije dima i reakcijskih para u atmosferu. Obzirom da je svaki odljevak slučaj za sebe, zahtijeva se opsežna kontrola nodularnosti. Reakcijska komora smještena je u uljevnom sustavu, zbog čega se može očekivati niži izvadak (iskorištenje taline) te niži broj odljevaka u jednom kalupu. Zbog toga se često primjenjuje i modificirana verzija prema kojoj je reakcijska komora integralni dio uljevnice čaše.

Postupak obrade protjecanjem shematski je prikazan na slici 2.14f. Jedinica za obradu postavlja se između peći i kalupa ili između peći i lonca. U reakcijsku komoru koja se nalazi u jedinici za obradu stavlja se predlegura FeSiMg. Primarna talina ulijeva se u jedinicu za obradu i otapa predleguru u reakcijskoj komori pri čemu dolazi do obrade. Na drugom kraju jedinice za obradu postoji otvor kroz koji izlazi obrađena talina. Po potrebi u mlaz obrađene taline može se dodati cjepivo. Za vrijeme obrade smanjeno je bljeskanje, nastaje vrlo malo troske, te se postiže iskorištenje magnezija do 50 %. Nedostatak ovog postupka odnosi se na povišene gubitke temperature taline za vrijeme obrade.

2.4.3. Cijepljenje nodularnog lijeva

Cijepljenje je kemijska modifikacija taline pomoću koje se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije pothlađenja i povećanja broja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja [1]. Cjepivo se dodaje u maloj količini u talinu željeznog lijeva prije ili za vrijeme lijevanja taline u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja [1].

Najznačajniji učinci koji se postižu cijepljenjem su:

- modifikacija postojećih uključaka u talini da bi postali pogodna mjesta za nukleaciju nodularnog grafita,
- smanjenje pothlađenja taline tijekom skrućivanja,
- smanjenje sklonosti ka stvaranju primarnih karbida,
- smanjenje sklonosti ka stvaranju inverznog odbjela i međučelijastih karbida,
- smanjenje rekalescencije,
- poboljšanje svojstava odljevaka.

U tablici 2.7 prikazan je kemijski sastav različitih cjepiva za nodularni lijev.

Tablica 2.7. Kemijski sastav nekoliko cjepiva za nodularni lijev [3]

| Cjepivo | Kemijski sastav, mas. % | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------|----------|---------|-----------|-----|-----|------|------|-------------------|
| | Si | Al | Ca | Ba | Sr | Zr | Mn | Mg | RE |
| FeSi-Al-Ca | 75 | 0,6-1,25 | 0,6-1 | - | - | - | - | - | - |
| FeSi-Ba | 60-65 | 0,5-1,7 | 1,0 | 9-11 | - | - | - | - | - |
| FeSi-Ba | 60-65 | 1 | 0,8 | 0,8 | - | 6 | 6 | - | - |
| FeSi-Ba | 70-75 | 0,8-1,2 | 0,8-1,2 | 1,75-2,25 | - | - | - | - | - |
| FeSi-Ba | 60-65 | 1,5 | 2 | 5-6 | - | - | 9-10 | - | - |
| FeSi-Sr | 75 | < 0,5 | < 0,1 | - | 0,8 | - | - | - | - |
| FeSi-Zr | 80 | 1,5-2,5 | 2,5 | - | - | 1,5 | - | - | - |
| FeSi-Sr | 45-50 | < 0,5 | < 0,1 | - | 0,8 | - | - | - | - |
| FeSi-Ce | 45 | 0,5 | 0,5 | - | - | - | - | - | 13 (10 %Ce) |
| 45% FeSi-Mg | 45-50 | 0,8 | 0,8 | - | - | - | - | 1,25 | - |
| FeSi-La | 75 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | 2-2,5 %La |

* RE – elementi rijetkih zemalja

Cjepivo se može dodati u talinu na više načina [1]. Najviše korištena metoda cijepjenja je dodatak cjepiva u lonac zajedno s predlegurom prije nego što se počne puniti talinom iz peći. Postignuti učinak cijepjenja je slabiji. Pored toga, tijekom zadržavanja taline u loncu dolazi do slabljenja djelovanja cjepiva.

Kasno ili naknadno cijepjenje najčešće se provodi tako da se cjepivo dodaje u mlaz taline tijekom lijevanja u kalup [1]. Osim tog načina, cjepivo se može smjestiti i u uljevni sustav. Kasnim cijepljenjem postižu se daleko bolji učinci nego cijepljenjem u loncu uz manji dodatak cjepiva.

Radi postizanja većih učinaka u praksi se često kombiniraju obje navedene metode cijepjenja.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu analiziran je utjecaj debljine stijenke odljevka na morfologiju grafitnih čestica u feritnom silicijem očvrstnutom nodularnom lijevu. Ispitivanja su provedena na tri taline s različitim udjelima silicija.

Od svake taline odliven je jedan stepenasti odljevak koji ima sedam stijenki različitih debljina. Iz svake stijenke uzet je uzorak za metalografsku analizu mikrostrukture.

3.1. Izrada talina nodularnog lijeva

Primarne taline proizvedene su u srednje-frekventnoj indukcijskoj peći čiji kapacitet iznosi 2 t. Glavne komponente uložka bile su specijalno sivo sirovo željezo (udio 50 %), povratni nodularni lijev (udio 30 %) i čelični otpad (udio 20 %). Njihovi kemijski sastavi prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Kemijski sastav specijalnog sivog sirovog željeza (SSSŽ), povratnog nodularnog lijeva (PNL) i čeličnog otpada (ČO)

| | Element, mas. % | | | | | | | | | | | |
|------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | S | P | Cu | Ni | Cr | Mo | V | Sn | Mg |
| SSSŽ | 4,14 | 0,18 | 0,025 | 0,003 | 0,032 | - | - | - | - | - | - | - |
| PNL | 3,62 | 2,76 | 0,18 | 0,016 | 0,035 | - | - | - | - | - | - | 0,035 |
| ČO | 0,035 | 0,012 | 0,203 | 0,015 | 0,016 | 0,019 | 0,017 | 0,022 | 0,002 | <0,001 | 0,002 | - |
| | Udio ostalih prisutnih elementa u ČO: 0,005 %W, 0,001 %Ti, 0,002 %Co, 0,026 %Al | | | | | | | | | | | |

Osim navedenih komponenti, u peć je dodan ljevaonički FeSi da bi se ostvarili ciljani udjeli silicija u primarnim talinama, sredstvo za naugljičenje radi postizanja odgovarajućeg udjela ugljika te sredstvo za predobradu u količini od 0,1 % u odnosu na masu taline s ciljem povećanja nukleacijskog potencijala primarnih talina. Tablica 3.2 prikazuje kemijske sastave tih komponenti uložka.

Tablica 3.2. Kemijski sastav ljevaoničkog FeSi, sredstva za naugljičenje i sredstva za predobradu

| | Element, mas. % | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|------|------|------|-------|-----------|-------|------|------|-------|
| | Si | C | P | S | Al | Ca | Zr | N | Fe | Pepeo |
| Ljevaonički FeSi | 73,03 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 1,29 | - | - | - | ost. | - |
| Sredstvo za naugljičenje | - | 99,2 | - | 0,02 | - | - | - | 0,01 | - | 0,5 |
| Sredstvo za predobradu | 62 - 69 | - | - | - | 3 - 5 | 0,6 - 1,9 | 3 - 5 | - | ost. | - |

Kad je ostvaren ciljani kemijski sastav, primarne taline zagrijane na temperaturu od 1500 - 1530 °C ispuštene su iz indukcijske peći u lonac (slika 3.1a). Nakon toga uslijedila je nodulacija. U tu svrhu korištena je predlegura FeSiMg koja se u obliku punjenja nalazila u čeličnoj žici promjera 13 mm (slika 3.1b). Dodatak cjepiva u lonac iznosio je 0,6 % u

odnosu na masu taline. Tablica 3.3 prikazuje kemijski sastav upotrijebljene predlegure FeSiMg i cjepiva. Ukupno su proizvedene tri taline nodularnog lijeva. Ciljani udjeli silicija iznosili su: 3,1 mas. %, 3,8 mas. % i 4,3 mas. %.



a)



b)

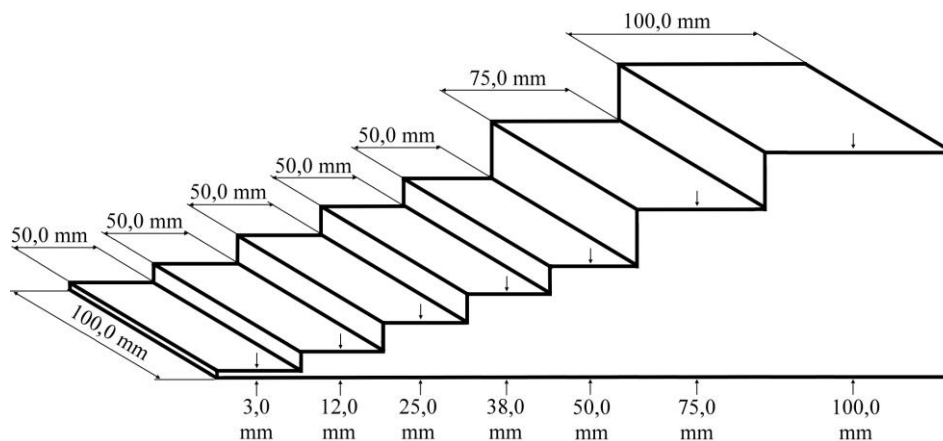
Slika 3.1. a) ispušt primarne taline odgovarajućeg kemijskog sastava i temperature iz indukcijske peći u lonac, b) nodulacija postupkom s punjenom žicom

Tablica 3.3. Kemijski sastav predlegure FeSiMg za nodulaciju i dodanog cjepiva u lonac

| | Element, mas. % | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | Si | Mg | Al | Ca | Ba | La | Ce | Fe |
| Predlegura FeSiMg | 42 | 29 | 0,9 | 1,4 | - | 0,2 | 0,5 | ost. |
| Cjepivo za cijepljenje u loncu | 67 – 72 | - | 1,9 | 1,5 | 2,2 | - | - | ost. |

3.2. Lijevanje stepenastih odljevaka

Od svake taline nodularnog lijeva odliven je jedan stepenasti odljevak koji sadrži sedam stepenica (stijenki) različitih debljina (slika 3.2). Lijevanje je provedeno u kalupe izrađene od svježe kalupne mješavine (slika 3.3). Temperatura lijevanja kretala se u intervalu od 1365 do 1380 °C. Tijekom lijevanja u mlaz svake taline dodano je cjepivo u količini od 0,15 % u odnosu na masu taline u kalupu. Njegov kemijski sastav prikazan je u tablici 3.4.



Slika 3.2. Shematski prikaz odlivenih stepenastih odljevaka



Slika 3.3. Lijevanje stepenastih odljevaka

Tablica 3.4. Kemijski sastav cjepiva dodanog u mlaz taline za vrijeme lijevanja u kalup

| | Element, mas. % | | | | |
|---|-----------------|-------------|-------------|---------|-------|
| | Si | Al | Ca | Ce | S i O |
| Cjepivo za cijepljenje u mlaz taline za vrijeme lijevanja u kalup | 70 – 76 | 0,75 – 1,25 | 0,75 – 1,25 | 1,5 – 2 | < 1 |

3.3. Uzimanje uzoraka za metalografsku analizu iz stepenastih odljevaka

Po duljini svakog stepenastog odljevka izrezan je središnji dio debljine 20 mm, kako je prikazano na slikama 3.4 i 3.5.

Stepenasta proba odozgo

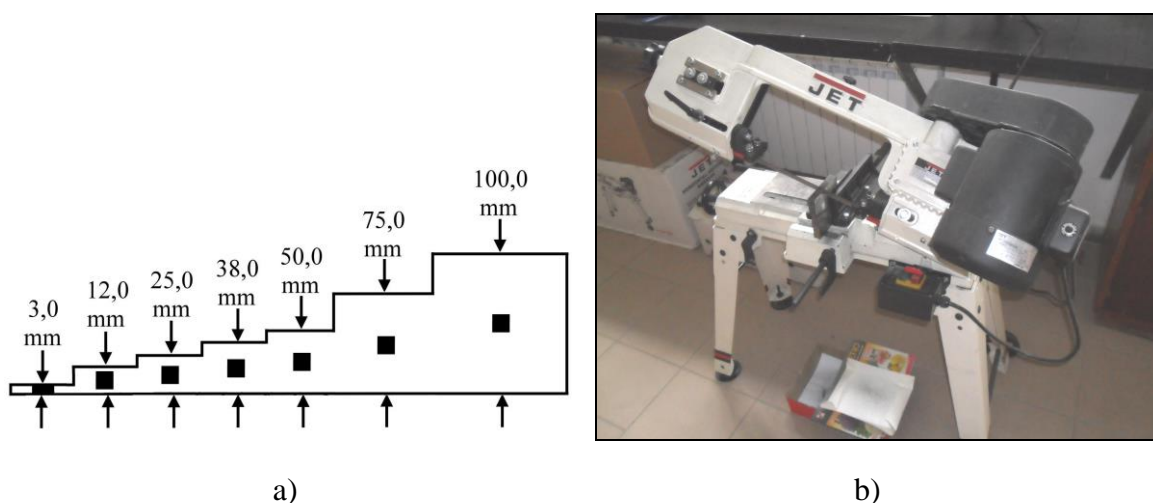
| | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 50,0 mm | 50,0 mm | 50,0 mm | 50,0 mm | 50,0 mm | 75,0 mm | 100,0 mm | 40,0 mm |
| | | | ISPITNI | | SEGMENT | | 20,0 mm |
| | | | | | | | 40,0 mm |

Slika 3.4. Shematski prikaz izrezivanja segmenta po duljini stepenastih odljevaka



Slika 3.5. Segmenti izrezani iz sva tri stepenasta odljevka

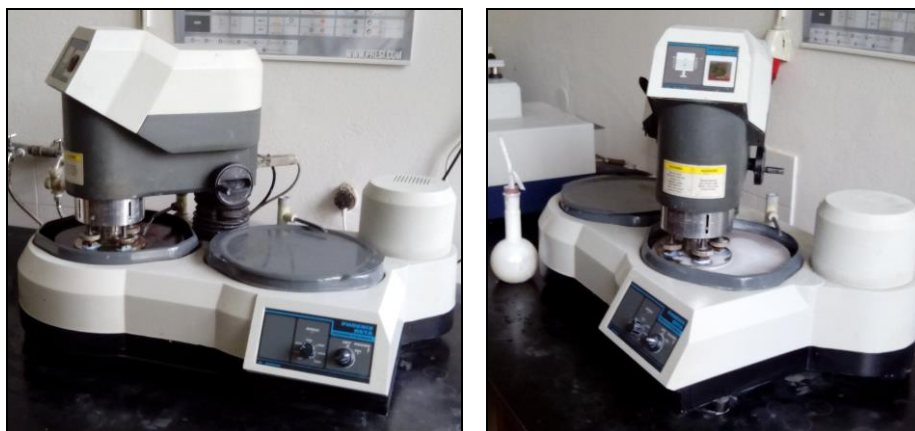
Uzorak za metalografsku analizu izrezan je iz sredine svake stepenice na tračnoj rezalici (slike 3.6a i 3.6b).



Slika 3.6. a) shematski prikaz uzimanja uzoraka za metalografsku analizu iz segmenta stepenastog odljevka, b) izrezivanje uzoraka za metalografsku analizu iz segmenta stepenastog odljevka na tračnoj rezalici

3.4. Metalografska analiza

Uzorci za metalografsku analizu zaliveni su u polimernu smolu i potom brušeni i polirani na uređaju za pripremu uzoraka (slika 3.7).



a)

b)

Slika 3.7. Priprema uzoraka za metalografsku analizu: a) brušenje, b) poliranje

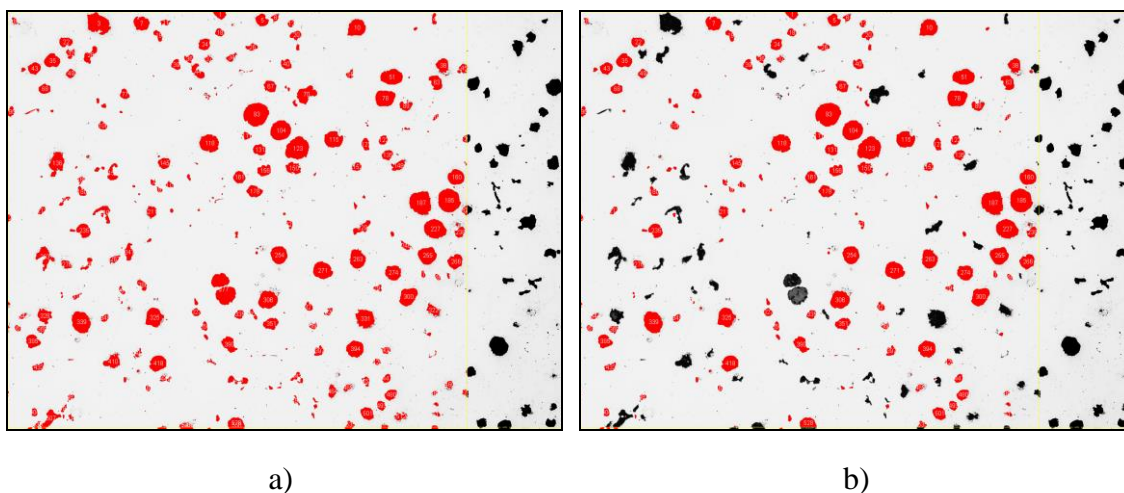
Mikrostrukture analiziranih uzoraka nodularnog lijeva snimljene su pomoću metalografskog mikroskopa OLYMPUS GX 51 opremljenog s digitalnom kamerom (slika 3.8). Programski paket AnalySIS® Materials Research Lab korišten je za određivanje mikrostrukturnih značajki analiziranih uzoraka (slika 3.8).



Slika 3.8. Metalografski mikroskop OLYMPUS GX 51 s digitalnom kamerom i računalom na kojem se nalazi programskim paketom AnalySIS® Materials Research Lab za određivanje mikrostrukturnih značajki analiziranih uzoraka

Metalografska analiza najprije je provedena na nenagrizenim uzorcima radi analize grafitnih čestica u njihovoj mikrostrukturi. Broj grafitnih čestica/mm², broj nodula/mm² i nodularnost određeni su na metalografskim snimkama kod povećanja 100x. Analiza je

provedena na pet snimki nakon čega su određene srednje vrijednosti za svaku navedenu mikrostrukturnu značajku. Određivanje broj nodula/mm² i nodularnosti provedeno je prema normi ASTM 2567-11. U skladu s normom, faktor oblika (engl. *Shape Factor- SF*), koji predstavlja omjer površine čestice grafita i površine kruga opisanog oko nje, korišten je kao kriterij za klasifikaciju grafitnih čestica. Čestice grafita čiji je faktor oblika $SF > 0,625$ smatrane su nodulom (prema normi minimalna vrijednost SF faktora za nodulu iznosi 0,5). Nodularnost je izračunata tako da je broj grafitnih nodula/mm² podijeljen s brojem grafitnih čestica/mm². Primjer određivanja broja grafitnih čestica/mm² i broja nodula/mm² u jednom od analiziranih uzoraka prikazan je na slici 3.9.



Slika 3.9. Primjena programskog paketa AnalySIS® Materials Research Lab i norme ASTM 2567-11 za određivanje broja grafitnih čestica/mm² (a) i broja grafitnih nodula/mm² (b) na jednoj od metalografskih snimki mikrostrukture stijenke debljine 100 mm i stepenastog odljevka broj 3

Nakon prethodno opisane analize uzorci su nagrizeni u 5,0 %-tnom nitalu ($\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) radi određivanja udjela ferita i perlita u metalnoj osnovi. Analiza je provedena na pet snimki. Udjeli ferita i perlita određeni su kao srednja vrijednost pet mjerenja.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Kemijski sastav stepenastih odljevaka

Kemijski sastav stepenastih odljevaka od silicijem očvrnutog nodularnog lijeva prikazan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Kemijski sastav stepenastih odljevaka (SO)

| Element | Udio elementa u stepenastom odljevku (SO), mas. % | | |
|---------|---|-------|-------|
| | SO1 | SO2 | SO3 |
| C | 3,35 | 3,19 | 3,04 |
| Si | 3,11 | 3,80 | 4,22 |
| Mn | 0,128 | 0,104 | 0,129 |
| S | 0,009 | 0,010 | 0,013 |
| P | 0,030 | 0,031 | 0,028 |
| Mg | 0,037 | 0,031 | 0,059 |
| Cr | 0,028 | 0,026 | 0,026 |
| Ni | 0,016 | 0,016 | 0,012 |
| Cu | 0,023 | 0,016 | 0,019 |
| Sn | 0,005 | 0,006 | 0,006 |
| Mo | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| V | 0,011 | 0,009 | 0,010 |
| Nb | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Ti | 0,010 | 0,009 | 0,013 |
| Al | 0,015 | 0,016 | 0,017 |
| CE | 4,40 | 4,47 | 4,46 |

Iz podataka prikazanih u tablici 4.1 može se vidjeti da su postignuti ciljani udjeli silicija u stepenastim odljercima. Zbog visokih udjela silicija, u sva tri slučaja ugljični ekvivalent (CE) viši je od 4,3. To ukazuje da se radi o nodularnim ljevovima nadeutektnog sastava. Udio ugljika postepeno je snižavan s povećanjem udjela silicija kako bi se izbjegli jako nadeutektni sastavi i moguće greške u mikrostrukturi povezane s njim, kao što su flotacija grafitnih čestica i stvaranje eksplozivnog grafita u debelim stijenkama.

Udio magnezija u okviru je uobičajenih granica za nodularni ljev. To je vrlo važno za proizvodnju nodularnog lijeva jer preniski udjeli magnezija negativno utječu na broj nodula i nodularnost. Prema tome, ako su u mikrostrukturi analiziranih stepenastih odljevaka prisutne grafitne čestice nepravilnog oblika, tj. čestice čiji oblik odstupa od oblika nodule, uzrok njihovog stvaranja nije povezan s udjelom magnezija.

U sva tri stepenasta odljevaka udio mangana, kroma, vanadija, niobija, molibdena i titana, tj. karbidotvornih elemenata je nizak. Zbog visokih udjela silicija i niskog udjela karbidotvornih elemenata u mikrostrukturi stepenastih odljevaka ne očekuju se karbidi.

Udjeli perlitizatora, tj. mangana, bakra, kositra i fosfora relativno su niski, što bi u kombinaciji s visokim udjelima silicija trebalo rezultirati visokim udjelima ferita u metalnoj osnovi. Međutim, treba uzeti u obzir da stepenasti odljevci sadrže i jako debele stijenke (50, 75 i 100 mm) koje sporo skrućuju čime se pospješuju segregacije pojedinih

elemenata. Zbog toga bi bilo korisno da su udjeli perlitizatora još niži, posebno mangana i fosfora.

Prema normi za nodularni lijev EN 1563:2011 [6] kemijski sastavi stepenastih odljevaka odgovaraju sljedećim kvalitetama feritnih silicijem očvrnutih nodularnih ljevova: SO1 – kvaliteta EN-GJS-450-18, SO2 – kvaliteta EN-GJS-500-14 i SO3 – kvaliteta EN-GJS-600-10.

4.2. Mikrostrukturne značajke stepenastih odljevaka

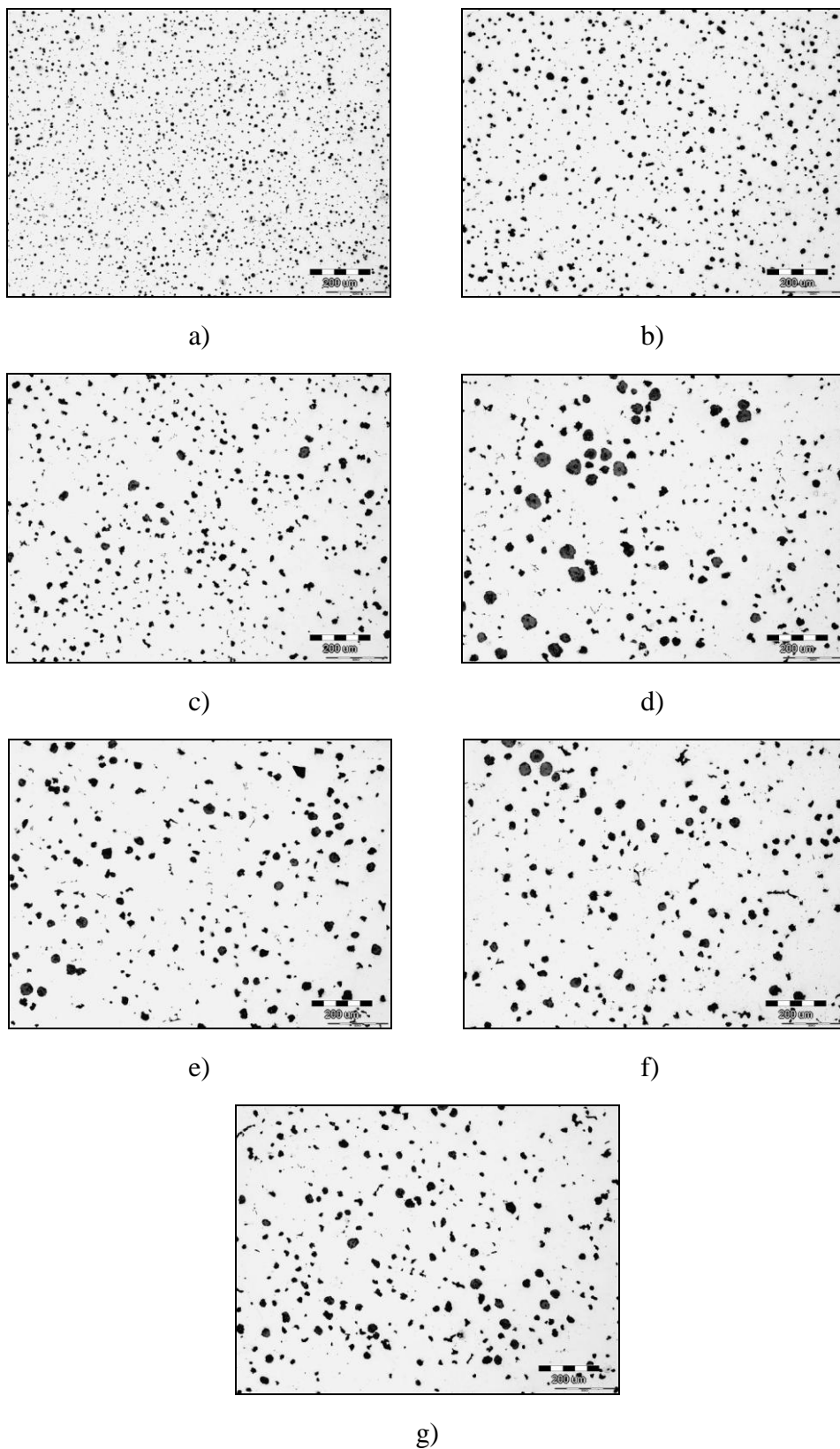
U tablici 4.2 prikazane su mikrostrukturne značajke stepenastih odljevaka.

Tablica 4.2. Mikrostrukturne značajke stepenastih odljevaka (SO)

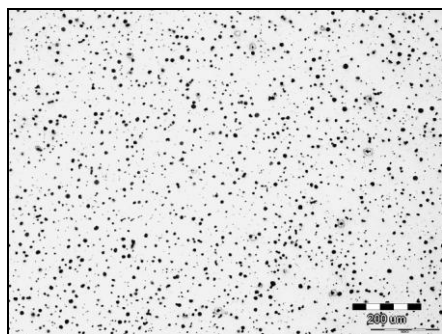
| Stepenasti odljevak | d , mm | Modul, M , cm | Broj nodula/mm ² | Nodularnost, % | Metalna osnova | |
|---------------------|----------|-----------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | | | | Udio ferita, % | Udio perlita, % |
| SO1 | 3 | 0,145 | 349 | 88,7 | 90,57 | 9,43 |
| | 12 | 0,50 | 315 | 88,1 | 95,35 | 4,65 |
| | 25 | 0,89 | 253 | 82,6 | 94,51 | 5,49 |
| | 38 | 1,45 | 170 | 78,5 | 95,14 | 4,86 |
| | 50 | 1,54 | 164 | 78,2 | 90,38 | 9,62 |
| | 75 | 1,96 | 155 | 76,1 | 90,97 | 9,03 |
| | 100 | 1,90 | 168 | 78,1 | 92,48 | 7,52 |
| SO2 | 3 | 0,145 | 374 | 91,7 | 91,91 | 8,09 |
| | 12 | 0,50 | 326 | 91,0 | 96,88 | 3,12 |
| | 25 | 0,89 | 336 | 86,8 | 100 | 0 |
| | 38 | 1,45 | 273 | 86,1 | 100 | 0 |
| | 50 | 1,54 | 141 | 73,2 | 100 | 0 |
| | 75 | 1,96 | 119 | 71,1 | 100 | 0 |
| | 100 | 1,90 | 159 | 73,9 | 100 | 0 |
| SO3 | 3 | 0,145 | 388 | 93,9 | 94,28 | 5,72 |
| | 12 | 0,50 | 330 | 84,6 | 97,82 | 2,18 |
| | 25 | 0,89 | 347 | 88,8 | 100 | 0 |
| | 38 | 1,45 | 290 | 88,6 | 100 | 0 |
| | 50 | 1,54 | 120 | 70,9 | 100 | 0 |
| | 75 | 1,96 | 87 | 68,6 | 100 | 0 |
| | 100 | 1,90 | 146 | 71,7 | 100 | 0 |

Metalografske snimke mikrostrukture stepenastih odljevaka u nenagrizenom i nagrizenom stanju prikazane su na slikama 4.1 do 4.6. Tablica 4.2 i slike 4.1 do 4.6 pokazuju da je debljina stijenke u velikoj mjeri utjecala na mikrostrukturne značajke stepenastih odljevaka.

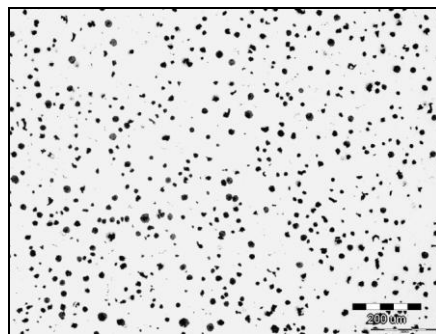
U mikrostrukтури stepenastih odljevaka nisu prisutni karbidi, čak ni u stijenci debljine 3 mm. Visoki udjeli silicija u kombinaciji s niskim udjelom karbidotvornih elemenata i visokim nukleacijskim potencijalom talina spriječili su stvaranje karbida. Visok nukleacijski potencijal talina rezultat je visokog udjela sivog sirovog željeza u ulošku, predobrade i snažnog cijepljenja u loncu i u mlaz taline tijekom lijevanja u kalupe.



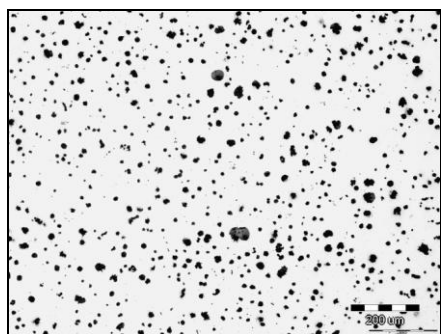
Slika 4.1. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO1 u nenagrizenom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm



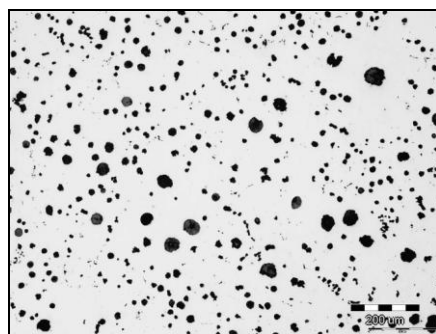
a)



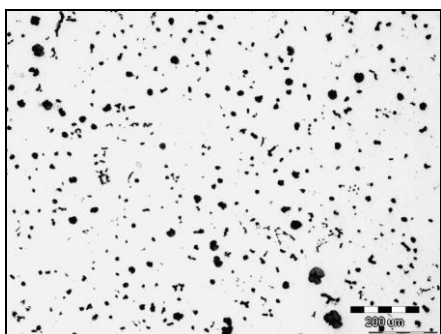
b)



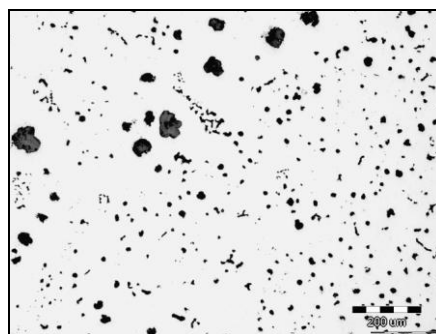
c)



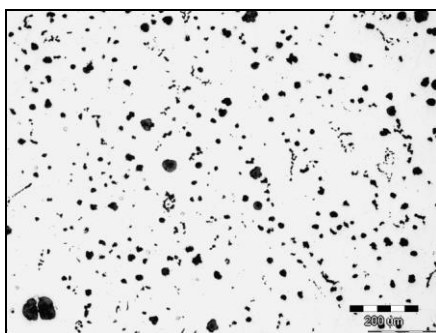
d)



e)

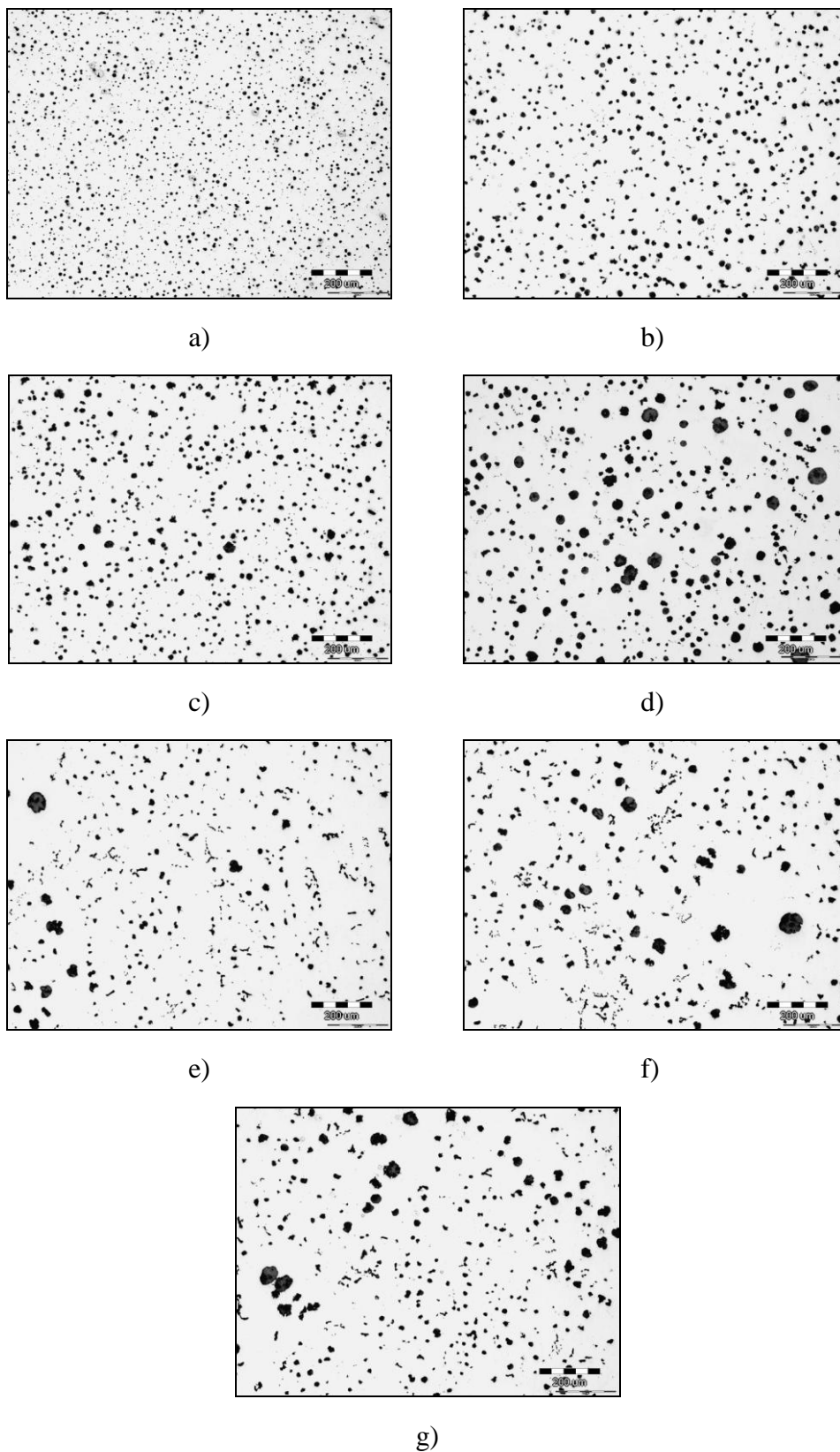


f)

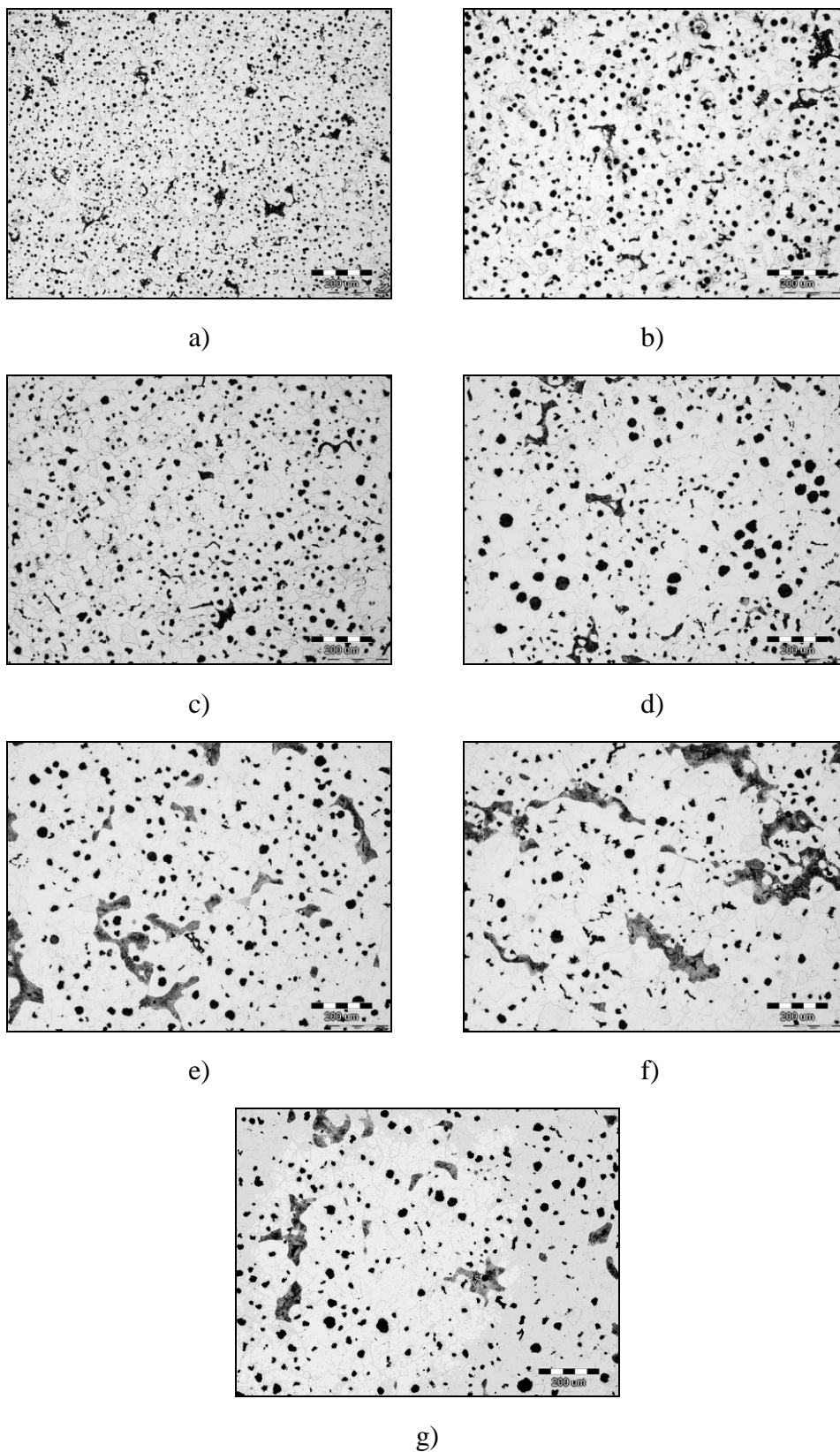


g)

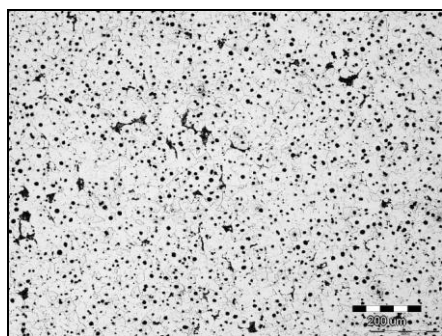
Slika 4.2. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO₂ u nenagrizenom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm



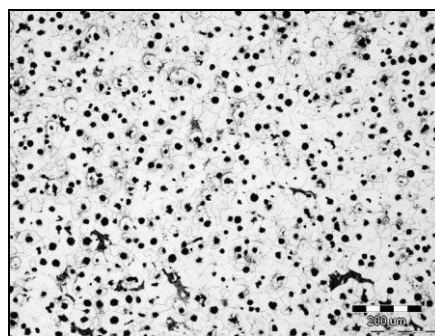
Slika 4.3. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO₃ u nenagrizenom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm



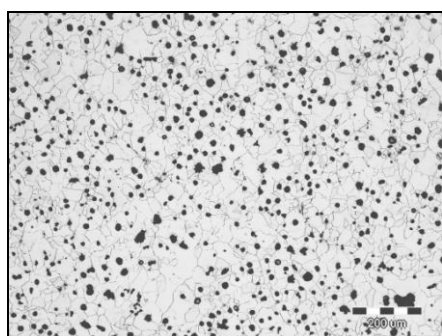
Slika 4.4. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO1 u nagrizenom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm



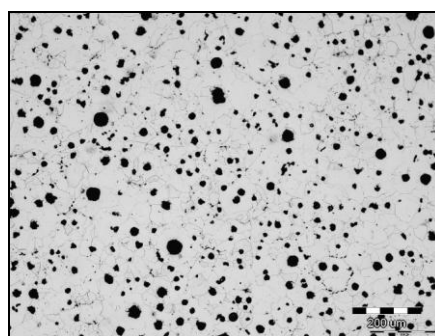
a)



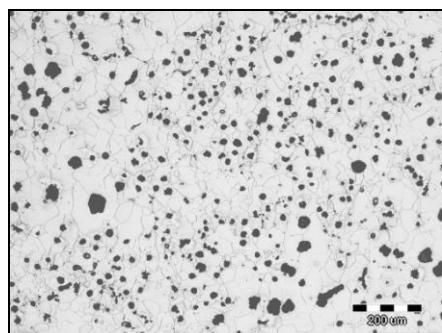
b)



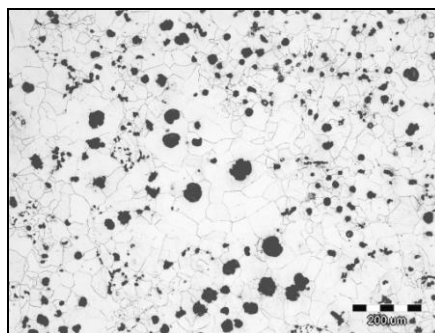
c)



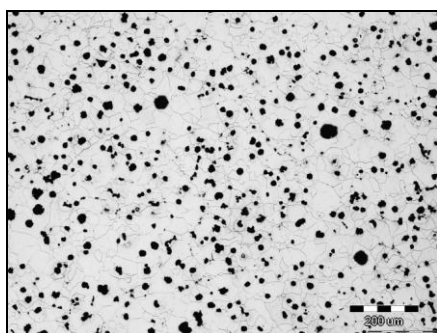
d)



e)

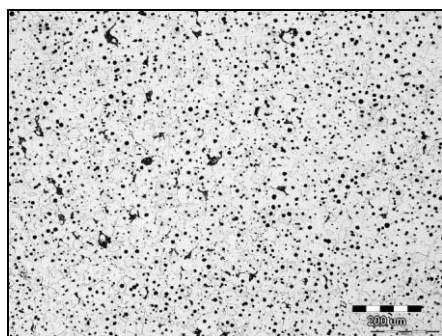


f)

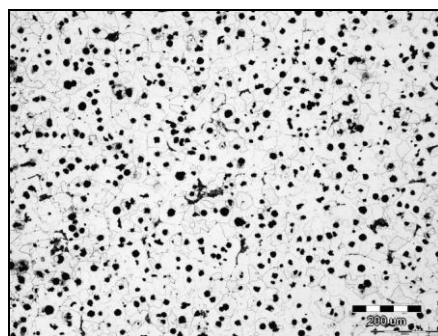


g)

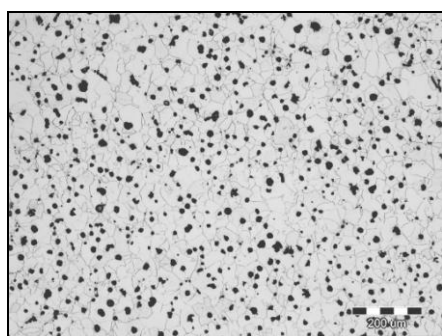
Slika 4.5. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO₂ u nagrizenom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm



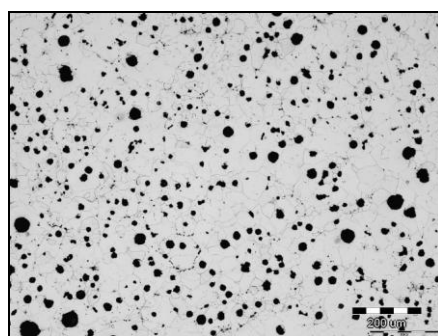
a)



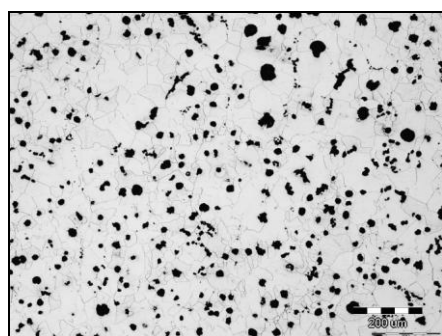
b)



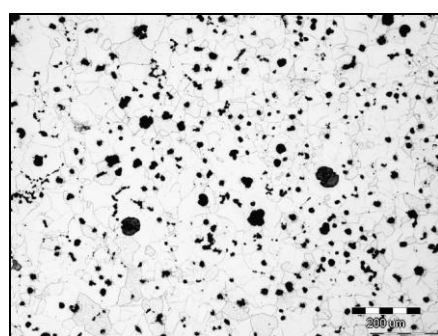
c)



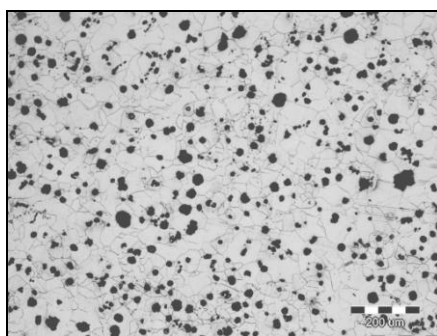
d)



e)



f)

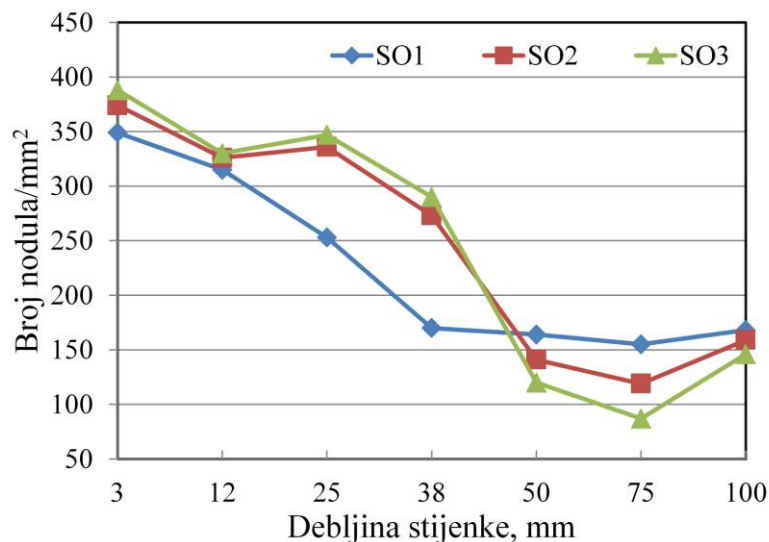


g)

Slika 4.6. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO₃ u nagriženom stanju: a) stijenka debljine 3 mm, b) stijenka debljine 12 mm, c) stijenka debljine 25 mm, d) stijenka debljine 38 mm, e) stijenka debljine 50 mm, f) stijenka debljine 75 mm, g) stijenka debljine 100 mm

4.3. Utjecaj debljine stijenke na broj nodula/mm² i nodularnost

U tablici 4.2 i na slikama 4.1 do 4.3 može se vidjeti da je debljina stijenke značajno utjecala na broj nodula/mm² u mikrostrukturi stepenastih odljevaka. U sva tri stepenasta odljevka broj nodula/mm² smanjuje se s povećanjem debljine stijenke, što se jasno vidi na slici 4.7. Između tankih stijenki (tj. stijenki debljine 3 i 12 mm) i debelih stijenki (tj. stijenki debljine 50, 75 i 100 mm) postoji velika razlika u broju nodula/mm². Osim toga, slike 4.1 do 4.3 pokazuju da se veličina nodula povećava sa smanjenjem njihovog broja, tj. s povećanjem debljine stijenke.



Slika 4.7. Utjecaj debljine stijenke na broj nodula/mm² u mikrostrukturi stepenastih odljevaka

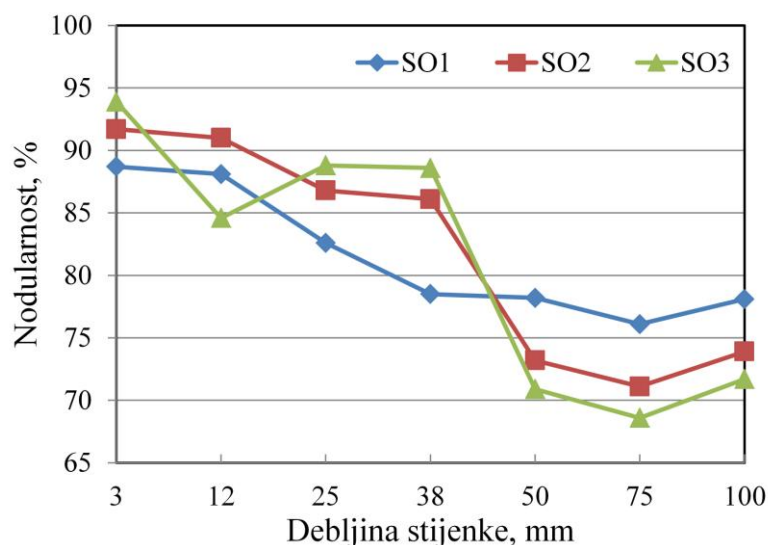
Debljina stijenke značajno je utjecala i na nodularnost grafita u sva tri stepenasta odljevka. U tablici 4.2 i na slikama 4.1, 4.2, 4.3 i 4.8 može se vidjeti da nodularnost opada s porastom debljine stijenke, odnosno smanjenjem brzine hlađenja. Usporedbom dijagrama na slikama 4.7 i 4.8 može se vidjeti da smanjenje nodularnosti s povećanjem debljine stijenke ima vrlo sličan trend kao smanjenje broja nodula/mm² s povećanjem debljine stijenke, što je i očekivano jer nodularnost prvenstveno ovisi o broju nodula.

Debljina stijenke odljevka usko je povezana s brzinom hlađenja tijekom skrućivanja. Što je stijenka odljevka tanja veća je brzina hlađenja, odnosno skrućivanja. Pothlađenje taline, kao pokretačka sila za nukleaciju grafitnih čestica, povećava se s povećanjem brzine hlađenja. S porastom pothlađenja povećava se broj mjesta za nukleaciju grafitnih nodula i brzina nukleacije, što rezultira povećanjem broja nodula i smanjenjem njihove veličine.

S povećanjem brzine hlađenja povećava se brzina formiranja austenitne ovojnice oko nodula tijekom skrućivanja. To znači da pri brzom hlađenju austenit brzo obavija nodule nakon njihovog nastanka i na taj način onemogućuje da nodule budu duže vrijeme u kontaktu s talinom. U tom slučaju nodule zadržavaju svoju malu veličinu te sferičan oblik što je ključno za postizanje visoke nodularnosti. Dakle, tijekom brzog hlađenja smanjuje se mogućnost degeneracije nodula, što pozitivno utječe na broj nodula i nodularnost.

Sporo hlađenje otežava formiranje austenitne ovojnice oko nodula, zbog čega je nodula duže vrijeme u kontaktu s talinom. U tom slučaju može doći do nejednoličnog rasta nodule, a time i do njene degeneracije, posebno u slučaju neravnomjernog obavijanja nodule austenitom. To rezultira smanjenjem broja nodula i povećanjem broja grafitnih

čestica koje se po obliku ne mogu smatrati nodulom, zbog čega u konačnici opada i nodularnost.



Slika 4.8. Utjecaj debljine stijenke na nodularnost grafitnih čestica u mikrostrukturi stepenastih odljevaka

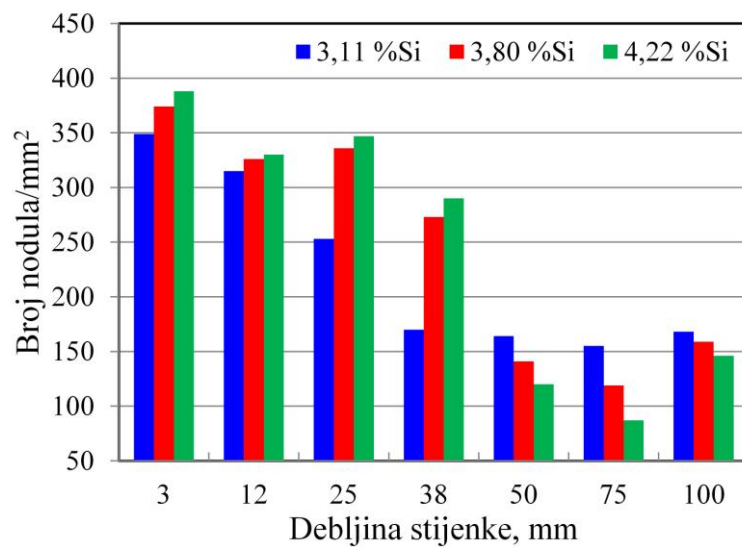
Na dijagramu prikazanom na slici 4.8 može se vidjeti da je nodularnost u stijenkama debljine 50, 75 i 100 mm u sva tri stepenasta odljevka ispod 80 %. Iako su feritni silicijem očvršnuti nodularni ljevovi manje osjetljivi na nodularnost od nodularnih ljevova očvršnutih perlitom [6], bilo bi korisno istražiti da li se promjenom kemijskog sastava cjepiva i dodane količine te povećanjem brzine hlađenja primjenom hladila može povećati nodularnost u navedenim stijenkama.

4.4. Utjecaj udjela silicija na broj nodula/mm² i nodularnost

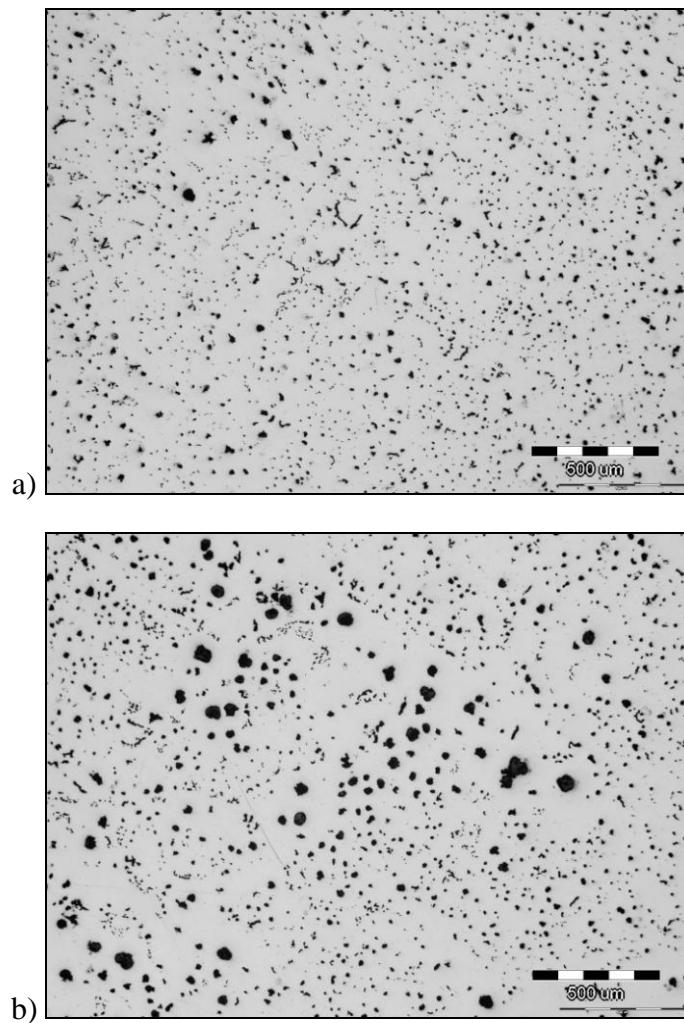
Dobiveni rezultati pokazuju da je na broj nodula/mm² i nodularnost, osim debljine stijenke, značajno utjecao i udio silicija (tablica 4.2, slike 4.1, 4.2, 4.3 i 4.9).

U tankim i srednje debelim stijenkama, tj. stijenkama debljine 3, 12, 25 i 38 mm broj nodula/mm² povećava se s povećanjem udjela silicija. To upućuje da povećanje grafitizacijskog potencijala taline koje je postignuto povećanjem udjela silicija pri dovoljno brzom hlađenju može dovesti do povećanja broja nodula/mm².

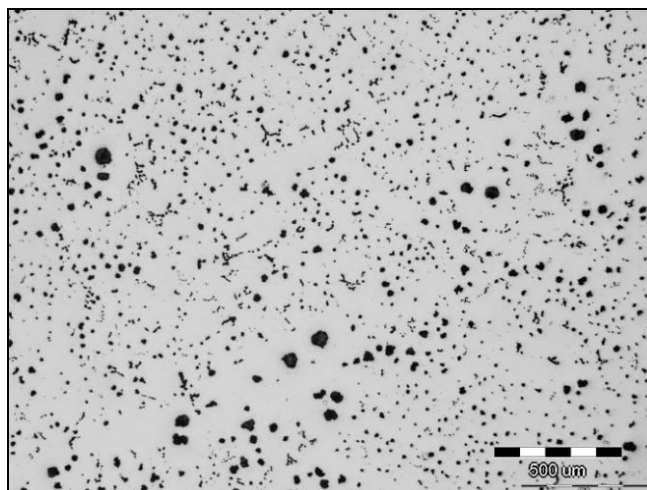
Dobiveni rezultati pokazuju da u debelim stijenkama, tj. stijenkama debljine 50, 75 i 100 mm broj nodula/mm² opada s porastom udjela silicija. Na snimkama mikrostrukture stijenki debljine 50, 75 i 100 mm iz SO2 i SO3 koji sadrže 3,8, odnosno 4,22 %Si (slike 4.2 e), f) i g), 4.3 e), f) i g), 4.10 i 4.11) mogu se vidjeti brojne jako sitne nepravilne čestice grafita te nakupine grafitnih čestica koje podsjećaju na *chunky* grafit. Što je udio silicija veći i brzina hlađenja niža, ti efekti su izraženiji. U stijenkama debljine 50, 75 i 100 mm iz SO1 koji sadrži 3,11 % Si nisu uočene navedene morfologije grafita. Iz ovoga se može zaključiti da visoki udjeli silicija negativno utječu na morfologiju grafita u debelim stijenkama.



Slika 4.9. Utjecaj udjela silicija na broj nodula/mm² u mikrostrukтури svih stijenki iz stepenastih odljevaka

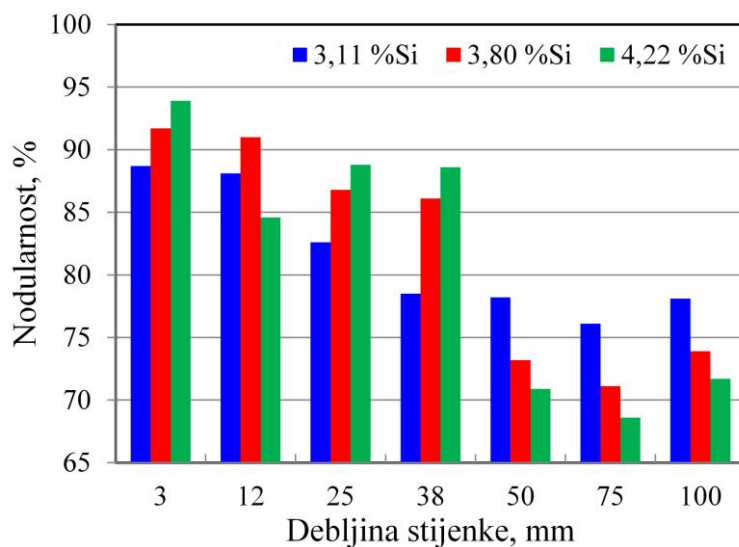


Slika 4.10. Metalografske snimke mikrostrukture stepenastog odljevka SO₃ u nenagrizenom stanju pri povećanju 50x: a) stijenka debljine 50 mm, b) stijenka debljine 75 mm



Slika 4.11. Metalografska snimka mikrostrukture stijenke debljine 100 mm iz stepenastog odljevka SO3 u nenagrizenom stanju pri povećanju 50x

Utjecaj udjela silicija na nodularnost identičan je njegovom utjecaju na broj nodula/mm². U stijenjkama debljine 3, 12, 25 i 38 mm nodularnost se povećava s povećanjem udjela silicija, jer se povećava broj nodula (slika 4.12).

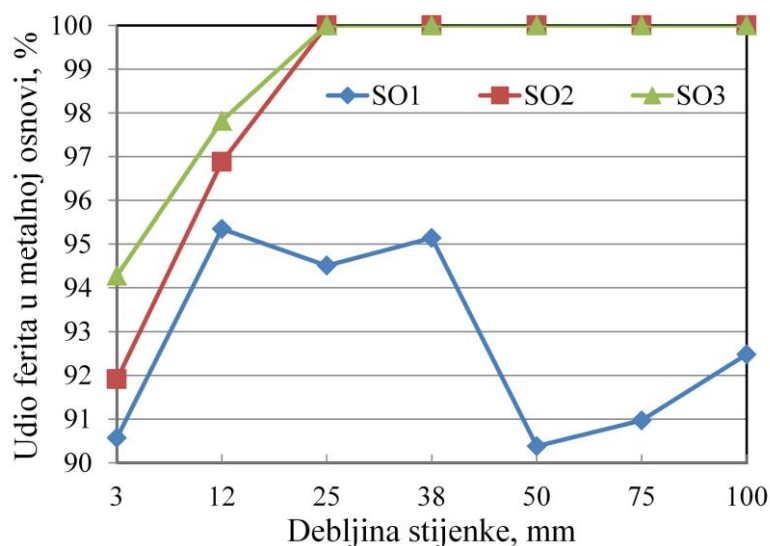


Slika 4.12. Utjecaj udjela silicija na nodularnost grafitnih čestica u mikrostrukтури svih stijenki iz stepenastih odljevaka

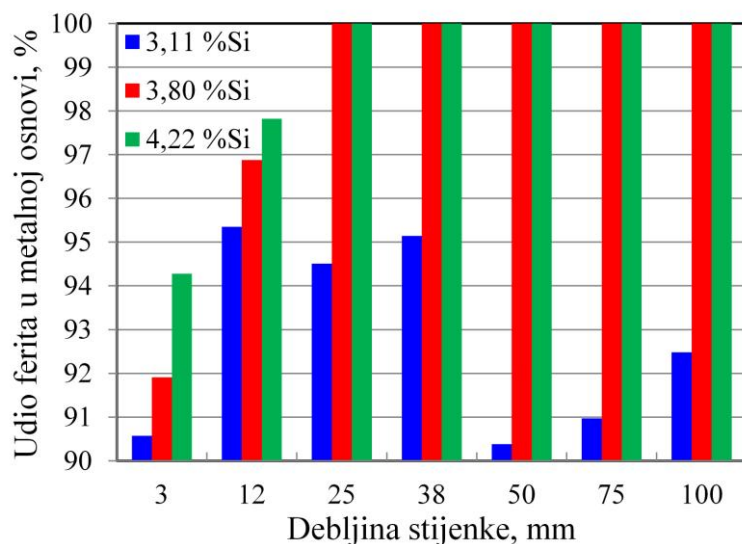
U debelim stijenjkama, tj. stijenjkama debljine 50, 75 i 100 mm nodularnost opada s porastom udjela silicija jer se smanjuje broj nodula/mm² i povećava broj nepravilnih grafitnih čestica, tj. čestica koje po obliku nisu nodule (slika 4.12).

4.5. Utjecaj debljine stijenke i udjela silicija na udio ferita u metalnoj osnovi

Podaci u tablici 4.2 i slike 4.4, 4.5, 4.6, 4.13 i 4.14. jasno pokazuju da udio ferita u metalnoj osnovi stepenastih odljevaka značajno ovisi o debljini stijenke i udjelu silicija. Pri tome utjecaj debljine stijenke i udjela silicija treba promatrati zajedno, a ne odvojeno.



Slika 4.13. Utjecaj debljine stijenke na udio ferita u metalnoj osnovi stepenastih odljevaka



Slika 4.14. Utjecaj udjela silicija na udio ferita u metalnoj osnovi svih stijenki iz stepenastih odljevaka

Iz dijagrama prikazanog na slici 4.13 može se vidjeti da se u sva tri stepenasta odljevka udio ferita u metalnoj osnovi povećava s povećanjem debljine stijenke sa 3 na 12 mm jer se smanjuje brzina hlađenja. Difuzija ugljika iz austenita na grafitne nodule tijekom hlađenja odljevka nakon završetka skrućivanja povećava se sa smanjenjem brzine hlađenja.

Prema tome, sporije hlađenje rezultira većim smanjenjem udjela ugljika u austenitu, što omogućuje njegovu pretvorbu u ferit u eutektoidnom području.

Dijagrami na slikama 4.13. i 4.14. pokazuju da se udio ferita u metalnoj osnovi stijenki debljine 3 i 12 mm povećava s porastom udjela silicija jer je silicij element koji promovira stvaranje ferita. Zbog velike brzine hlađenja ovih stijenki potpuno feritna metalna osnova nije postignuta ni pri udjelu silicija od 4,22 %. Pored feritizacijskog učinka silicija, treba uzeti u obzir da se s povećanjem udjela silicija povećao i broj nodula/mm² u navedenim stijenkama (tablica 4.2, slika 4.9). Broj nodula također utječe na udio ferita u metalnoj osnovi jer nodule prihvaćaju ugljik iz austenita. Što je veći broj nodula, više je mjesta koja mogu prihvatiti ugljik iz austenita i kraći su putovi difuzije ugljika iz austenita. Prema tome, s povećanjem broja nodula povećava se mogućnost stvaranja ferita.

Udio ferita u stijenkama debljine 25 do 100 mm iz stepenastih odljevaka SO2 i SO3 iznosi 100 % što je rezultat visokih udjela silicija u kombinaciji s dovoljno sporim hlađenjem. U stepenastom odljevku SO1 stijenke debljine 25 do 100 mm ne sadrže potpuno feritnu metalnu osnovu. Čak ni jako sporo hlađenje, kao u slučaju stijenke debljine 100 mm nije spriječilo stvaranje manjeg udjela perlita. Ključni razlog je niži udio silicija nego u SO2 i SO3. Povećanjem broja nodula/mm² i dodatnim smanjenjem udjela elemenata koji pospješuju stvaranje perlita mogao bi se povećati udio ferita u stijenkama debljine 25 do 100 mm iz SO1.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata ispitivanja utjecaja debljine stijenke odljevka na mikrostrukturu feritnog silicijem očvrnutog nodularnog lijeva koji sadrži 3,11, 3,8 i 4,22 %Si može se zaključiti sljedeće:

- debljina stijenke i udio silicija značajno su utjecali na mikrostrukturu feritnog silicijem očvrnutog nodularnog lijeva,
- broj nodula/mm² smanjio se, a veličina nodula povećala se s povećanjem debljine stijenke od 3 do 100 mm zbog smanjenja brzine hlađenja,
- nodularnost se smanjila s porastom debljine stijenke od 3 do 100 mm, odnosno sa smanjenjem brzine hlađenja zbog pada broja nodula/mm²,
- u tankim i srednje debelim stijenrama, tj. stijenrama debljine 3, 12, 25 i 38 mm broj nodula/mm² povećao se s porastom udjela silicija od 3,11 do 4,22 % zbog povećanja grafitizacijskog potencijala taline,
- u debelim stijenrama, tj. stijenrama debljine 50, 75 i 100 mm broj nodula/mm² smanjio se s porastom udjela silicija od 3,11 do 4,22 %, što ukazuje da visoki udjeli silicija negativno utječu na morfologiju grafita u debelim stijenrama,
- s porastom udjela silicija od 3,11 do 4,22 % u stijenrama debljine 50, 75 i 100 mm povećavao se broj jako sitnih nepravilnih grafitnih čestica i nakupina čestica grafita koje po obliku slične *chunky* grafitu,
- u stijenrama debljine 3, 12, 25 i 38 mm nodularnost se povećala s porastom udjela silicija jer se istovremeno povećao broj nodula/mm²,
- u stijenrama debljine 50, 75 i 100 mm nodularnost se smanjila s porastom udjela silicija jer se smanjio broj nodula/mm² i povećao broj nepravilnih grafitnih čestica,
- s porastom udjela silicija i debljine stijenke povećao se udio ferita u metalnoj osnovi,
- s povećanjem broja nodula/mm² povećava se mogućnost stvaranja ferita,
- u cilju dobivanja vrlo visokih udjela ferita u metalnoj osnovi treba što je više moguće smanjiti udio elemenata koji promoviraju stvaranje perlita,
- visoki udjeli silicija sprječavaju stvaranje karbida.

6. LITERATURA

- [1] Z. Glavaš, F. Unkić, Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [2] ..., Ductile Iron Data for Design Engineers, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 1998.
- [3] ..., The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 2004.
- [4] R. Larker, Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators, China Foundry 6(2009) 4, 343 – 351.
- [5] I. C. H. Hughes, Ductile Iron, in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1988., 647 - 666.
- [6] ..., European standard EN 1563:2011, Founding - Spheroidal graphite cast iron, European Committee for standardization, 2011.
- [7] T. Rupčić, Z. Glavaš, F. Unkić, Utjecaj mikrostrukturnih značajki na žilavost nodularnog lijeva, Proceedings of 11th International Foundrymen Conference, Foundry Industry – Significance and Future Challenges, ur. F. Unkić, Metalurški fakultet, Opatija, 28. – 29. travanj 2011., CD-ROM izdanje, rad br. 42-2011, 368-377.
- [8] Z. Glavaš, F. Unkić, D. Lisjak, The Prediction of the Microstructure Constituents of Spheroidal Graphite Cast Iron By Using Thermal Analysis and Artificial Neural Networks, Archives of Metallurgy and Materials 55(2010) 1, 247–253.
- [9] Z. Glavaš, A. Štrkalj, A. Stojaković, The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons, Metalurgija 55(2016) 3, 293 – 296.
- [10] Elkem Foundry products, Overview of alloying elements and their effects in ductile iron, Technical information 12B, (<http://www.scribd.com/doc/74039009/Elkem-Alloying-Elements-and-Their-Effects#scribd>)
- [11] K. Röhring, Djelovanje i izbor legiranih elemenata za niskolegirani sivi lijev s lisnatim i kuglastim grafitom, Ljevarstvo 31(1984) 2, 25 - 41.
- [12] E. N. Pan, W. S. Hsu, C. R. Loper, Jr., Effects of Some Variables on the Matrix and Mechanical Properties of Ferritic Ductile Irons, AFS Transactions 96(1988), 645 - 660.
- [13] F. Unkić, N. Gavranović, M. Vasilić, S. Hren, Effect of Silicon Content on Microstructures and Mechanical Properties of Spheroidal Graphite Cast Iron Grade EN-GJS-400-18-LT, Hommes & Fonderie N° 356, Juin/Juillet 2005., 50 - 58.
- [14] R. Larker, Solution Strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators, Proceedings of 2008 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Las Vegas, Nevada, 20 – 22 October 2008, 169 – 177.
- [15] K. Herfurth, R. Gorski, K. Beute, M. Hering, GOPAG® C 500 F, 1 – 8. https://www.gontermann-peipers.de/uploads/media/fachartikel_GOPAG_engl_01.pdf
- [16] ..., The Strengthening of Iron and Steel, <http://www.keytometals.com/Articles/Art107.htm>
- [17] M. Gedeon, Solid Solution hardening & Strength, Technical Tidbits, Issue No. 16, April 2010, Brush Wellman <https://materion.com/-/media/files/alloy/newsletters/technical-tidbits/issue-no-16-solid-solution-hardening--strength.pdf>

- [18] ...Strengthening Mechanisms,
<http://academic.uprm.edu/pcaceres/Courses/MechMet/MET-5A.pdf>
- [19] ..., Solid Solution strengthening,
http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_solution_strengthening
- [20] Strengthening mechanisms of materials,
http://en.wikipedia.org/wiki/Strengthening_mechanisms_of_materials
- [21] ..., Silicon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>
- [22] ..., Iron, <http://en.wikipedia.org/wiki/Iron>
- [23] W. Stets, H. Löblich, Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application, International Journal of Metalcasting 8(2014) 2, 35 - 40.
- [24] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, Influencing factors on as-cast and heat treated 400-18 ductile iron grade characteristics, China Foundry 4(2007) 4, 300 - 303.
- [25] C. F. Walton, Iron Castings Handbook, The Gray and Ductile Iron Founders` Society Inc., Cleveland, 1971.
- [26] L. Guerin, M. Gagné, Effect of Mn, Cu and Sn on the Microstructure and Properties of Ductile Iron Castings, The Foundryman **80**(1987) 8/9, 336 - 344.
- [27] D. Venugopalan, A. Alagarsamy, Influence of Microstructure and Chemical Composition on the Mechanical Properties of Ductile Iron, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron, Physical Metallurgy of Cast Iron IV, ur. G. Ohira, T. Kusakawa, E. Niyama, Materials Research Society, Tokyo, 4 - 6 September, 1989., 321 - 328.
- [28] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, Performance of heavy ductile iron castings for windmills, China Foundry 7(2010) 2, 163 - 170.
- [29] E. N. Pan, C. Y. Chen, Effects of Bi and Sb on graphite structure of heavy-section ductile cast iron, ASF Transaction 104(1996), 845 – 858.
- [30] ..., Ductile Iron Handbook, ed. W. A. Henning, J. Mercer, American Foundry Society, Inc., Illinois, 2010.
- [31] A. Stojaković, Z. Glavaš, F. Unkić, K. Terzić, The Effects of Casting Section Size and Metallic Charge Materials on Microstructure of Ductile Iron, Zbornik savjetovanja o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju, MATRIB 2011, ur. Z. Schauperl, S. Šolić, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Vela Luka, 29. lipanj – 1. srpanj 2011., 457–470.
- [32] P. Ferro, A. Fabrizi, R. Cervo, C. Carollo, Effect of inoculants containing rare earth metals and bismuth on microstructure and mechanical properties of heavy-section near-eutectic ductile iron castings, Journal of materials processing technology 213 (2013) 9, 1601 – 1608
- [33] J. Zhou, Spheroidal Graphite Cast Iron (II), China Foundry, 7(2010) 2, 183 – 198.
- [34] J. Zhou, W. Schmitz, S. Engler, Formation of Austenite Shell around Nodular Graphite and its Effects on Deterioration of Graphite, AFS Transactions 98(1990), 783 – 786.

ŽIVOTOPIS

OSOBNİ PODATCI:

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| Ime i prezime: | Ante Severinski |
| Datum i mjesto rođenja: | 19. srpnja 1994.g., Sisak |
| Adresa: | Ivana Cankara 7, 44000 Sisak |
| Telefon: | 044/547-905, 0917972202 |
| E-mali: | ante.severinski@gmail.com |

OBRAZOVANJE:

| | |
|---------------------|--|
| 2001.g. - 2009.g. - | Osnovna škola: Ivana Kukuljevića, Sisak |
| 2009.g. - 2013.g. - | Srednja škola: Zrakoplovna tehnička škola Rudolfa Perešina, Velika Gorica |
| 2013.g. - | Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet |

VJEŠTINE:

Rad na računalu
Strani jezik: Engleski, pasivno u govoru i pismu

NAGRADE I PRIZNANJA:

Uvjerenje o položenom ispitu za nogometnog suca, 2014.g.

AKTIVNOSTI:

Nogomet, trčanje